

# Testing av superledende spoler

**Eivind Engebretsen**

Master of Science in Electric Power Engineering

Oppgaven levert: Juni 2009

Hovedveileder: Magne Eystein Runde, ELKRAFT

Biveileder(e): Niklas Magnusson, SINTEF

Frode Sætre, SINTEF



# Oppgavetekst

SINTEF Energiforskning bygger to superledende spoler for bruk i en aluminiumsbolt induksjonsovn. Spolene vil bli lagd ved å spleise 32 delspoler. Hele spolesammenstillingen vil bli installert i en kryostat og ha en driftstemperatur på rundt 20K.

Masteroppgaven har en eksperimentell tilnærming og er hovedsakelig å sette sammen delspolene til to komplette spoler, kjøle spolene ned til driftstemperatur og teste dem. Dette inkluderer å støpe sammen delspolene, spleise det superledende båndet, designe og bygge et system for overvåkning av spenningsfall, temperatur fordeling og andre parametere som viser hvordan spolene fungerer i drift. Avgjørende spole og kryostat egenskaper som kritisk strøm ved forskjellige temperaturer, nedkjølingsprofil over tid, osv. burde bli målt.

Oppgaven gitt: 07. januar 2009

Hovedveileder: Magne Eystein Runde, ELKRAFT



## Sammendrag

Tradisjonelle induksjonsovner bruker vekselstrøm for å indusere strømmer og varme opp større aluminiumsdeler. Effektiviteten til ovnene ligger normalt mellom 55-60%, noe som gir et stort forbedringspotensial. Ved å erstatte kobberspolene med spoler av superledere og vekselstrømmen med likestrøm vil tapene i spolene bli neglisjerbare. Aluminiumsdelen som skal varmes opp må da roteres for å se et vekslende felt, noe som medfører en samlet virkingsgrad for systemet på ca 90 %. SINTEF har sammen med flere samarbeidspartnere konstruert en 200kW induksjonsovn basert på  $MgB_2$  superleder. Denne rapporten tar for seg sammensammensetning og testing av en superledende spole for bruk i den planlagte induksjonsovnen. I rapporten er alle nødvendige deler og metoder for å sette sammen spolen beskrevet og forklart. Spolen består av totalt 16 disk som ble skjøtet sammen i serie. Hver disk er 550mm og er viklet i en dobbel pannekake konstruksjon med 2 ganger 75 vindinger i hver disk. Under testingen brukte spolen 120 timer på å nå en stabil temperatur som lå under den kritisk temperatur for  $MgB_2$  superlederen (37K), og det ble gjort tester ved å føre en strøm på maks 10A gjennom spolen. Under strømtestene ble spenningsoppbygningen over alle skjøtene samt over alle spolediskene målt. Strømtestene avslørte at alle skjøtene i spolen hadde en motstand på under  $60n\Omega$ . En av spolediskene skilte seg ut og hadde en motstand på  $66,6\mu\Omega$  ved 10A, noe som tyder på et spoledisken har en defekt. Motstanden var for høy til å kunne gjøre tester med den planlagte strømstyrken på 200A. Induktansen til spolen ble målt til 4,9H.



## Forord

Dette prosjektet ble gjennomført våren 2009 og er avsluttende prosjekt for masterlinjen electrical power engineering ved NTNU. Prosjektet har fagkode TET4900 og utgjør hele arbeidsmengden dette semesteret. Prosjektet er individuelt, og alle masterstudentene har egne prosjekter. Det ble i hovedsak gjennomført ved bryter-høystrømslaben til SINTEF/NTNU i Trondheim. Gjennom prosjektperioden fikk jeg et godt innblikk i superledere og hvordan forskerne på SINTEF jobber.

Jeg vil takke min hovedveileder Magne Runde på SINTEF Energiforskning AS og med veilederne Niklas Magnusson og Frode Sætre på SINTEF Energiforskning AS. Alle veilederne har vært til god hjelp under prosjektperioden, og samarbeidet gav mange lærerike stunder på labben. Andre som har bidratt er Bård Almås på servicelabben ved NTNU, guttene på elkraftverkstedet til NTNU/SINTEF med Oddvar Landrø i spissen og Dag Linhjell. Disse bidro både med kunnskap relatert til problemløsning og hjelp med praktiske utfordringer.

Trondheim, juni 2009

Eivind Engebretsen





# Innhold

1 Innledning.....	1
2 Bakgrunn og teorigrunnlag.....	2
2.1 Induksjonsovner og Kryostaten .....	2
2.2 Superledere .....	3
2.3 Temperaturmålinger.....	5
2.4 Spenningsmålinger.....	8
2.5 Varmeledning.....	9
3 Montering av spolen.....	10
3.1 Skjøting av spoledeler og sammenliming.....	10
3.2 Montering av grenseflate 2 .....	14
3.3 Kjøling av skjøtene .....	15
3.4 System for spenningsmåling.....	16
3.5 Sammenkobling av spolen og lederstaver.....	17
3.6 Temperaturføleroppsett.....	21
3.7 Gjennomføringer og vakuumbutstyr.....	25
3.8 Kjølesystemet.....	26
3.9 Strømforsyningen.....	26
4 Forsøksbeskrivelse .....	28
4.1 Skjøtemotstand i romtemperatur.....	28
4.2 Temperaturprofil under nedkjølingen .....	28
4.3 Induktansmåling.....	28
4.4 Motstandsmålinger i nedkjølt tilstand.....	28
4.5 Test av strømkilde på alternativ krets .....	29
4.6 Test av strømkilde på superledende spole .....	29
4.7 Feltnmåling .....	29
4.8 Temperaturmålinger under oppvarming .....	29
4.9 Registrering av resultater .....	30
5 Resultater.....	31
5.1 Skjøtemotstand i romtemperatur.....	31
5.2 Temperaturprofil under nedkjølingen .....	32
5.3 Induktansmåling.....	34
5.4 Motstandsmåling i nedkjølt tilstand.....	35
5.5 Test av strømkilde på alternativ krets .....	39
5.6 Test av strømkilde på superledende spole .....	40
5.7 Feltnmåling .....	40
5.8 Temperaturmålinger under oppvarmingen .....	41
6 Diskusjon.....	42
7 Konklusjon.....	44
8 Referanser.....	45
9 Vedleggsliste .....	47

# 1 Innledning

Induksjonsovn er mye brukt i industrien for å varme større aluminiumsdeler. Metoden er enkel, men har sine negative sider. Hovedargumentet mot tradisjonelle oppvarmerne er den lave virkningsgraden. Virkningsgraden ligger normalt mellom 55 % og 60 %. (1) Dette gir et stort forbedringspotensial ved bruk av alternative metoder. Hvis man kunne bruke spoler av superledere og føre likestrøm i dem, ville virkningsgraden kunne økes betraktelig. Ulempene knyttet til superledende spoler og likestrøm har vært høye utgifter ved innkjøp, avanserte kjølesystemer og lite forskning på området. Ved bruk av vekselstrøm blir det opprettet et vekselvirkende felt som induserer strømmer i og varmer opp aluminiumsdelen. Hvis likestrøm skal benyttes, må aluminiumsdelen roteres for at den skal se et vekslende magnetfelt og blir induert strømmer i den. Dette medfører behov for komplekse mekaniske systemer.

Rapporten tar for seg ferdigstilling og testing av en superledende spole ment for likestrøm. Spolen er en del av et EU prosjekt kaldt ALUHEAT. Formålet med ALUHEAT var å konstruere, bygge og teste en 200kW induksjonsovn basert på superledende spoler. Prosjektet ble startet i 2005 og er et samarbeid mellom SINTEF Energiforskning, Fauenhofers Gesellschaft (Tyskland), Tampere University og Technology (Finland), Institute of Non-Ferrous Metals (Polen), Columbus Superconductors (Italia), GK Katy (Polen), SMS Elotherm (Tyskland), University of Hannover (Tyskland) og Skoda Vyzkum (Tsekkia).

EU prosjektet ble imidlertid avsluttet i 2008, mens SINTEF har videreført prosjektet. Dette har medført at sentrale komponenter som trengs for å fullføre induksjonsovnen ikke er blitt laget. Systemet som skulle sørge for rotasjonene til aluminiumsdelen ble aldri fullført. Formålet med dette prosjektet var imidlertid å sjekke at spolene fungerte som planlagt.

Rapporten tar for seg sammensetning og testing av en av spolene i prosjektet. To tidligere masterstudenter har jobbet med prosjekter relatert til ALUHEAT og arbeidet deres har blitt anvendt og videreført i dette prosjektet. Spolen skulle monteres i en kryostat som hadde blitt konstruert og levert til SINTEF i forkant av prosjektet. Spolene hadde en dobbelpannekake konstruksjon, og viklingen av dem ble gjort på våren 2008. Hovedmålet for prosjektgruppen var å få ferdigstilt kryostaten, lage et system for temperaturmåling på kryostaten, lage et system for spenningsmålinger av sentrale deler på spolen og teste kryostaten.

Rapporten går først inn på teori knyttet til kryostaten spolene skulle monteres i, superledere, temperaturfølere, spenningsmåling og varmeledning. Deretter følger dokumentasjon på alle komponenter som er laget for å ferdigstille spolen, samt montering av komponentene. Til slutt følger testing og resultater fra testing av den sammensatte kryostaten.

I forkant av ferdigstillingen ble det gjort forsøk på å kalibrere termoelementene som er brukt til temperaturmålinger i kryostaten. Kalibreringene viste såpass sprikende resultater at de ble sett bort fra under den endelige testingen. Kalibreringsforsøket med metoder og resultater ligger i sin helhet som Vedlegg 1.

## 2 Bakgrunn og teorigrunnlag

### 2.1 Induksjonsovner og Kryostaten

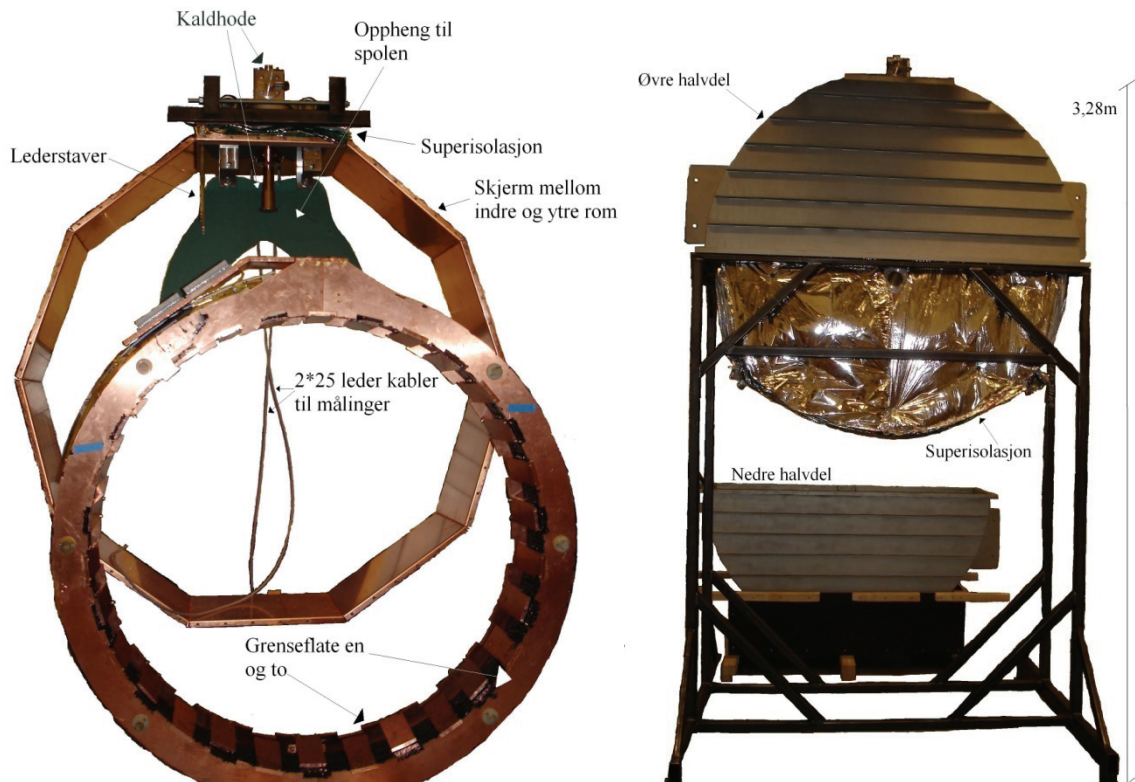
Tradisjonelle induksjonsovner bruker kobberspoler som fører AC strøm. (1) Det vekslende feltet inducerer strømmer i aluminiumsdelen og den blir varmet opp. I disse ovnene står delen som skal varmes opp parallelt med feltlinjene. Prosessen krever vannkjøling av kopper spolen, denne overskuddsvarmen bidrar til en dårlig effektutnyttelse. (1) Ved å bruke likestrøm i en superleder blir varmetviklingen i spolene lik null. Feltet som settes opp er konstant, noe som gjør at delen må ha en rotasjon vinkelrett på feltet for å varmes effektivt.

Effektiviteten vil kun være avhengig av effektiviteten til motoren som roterer bolten, og den effekten som kreves for å kjøle superlederen. For å kjøle superlederen kreves det en kryostat. Kryostater er systemer som kan kjøle objekter ned til kryogeniske temperaturer. Kryogeniske temperaturer er temperaturer på under -150 grader celsius. I ALUHEAT prosjektet var meningen å bruke to kryostater som skulle kjøle hver sin spole. Spolene ville sette opp et felt som hadde gitt en feltstyrke på 0,5T midt i aluminiumsdelen. (1) Aluminiumsdelen skulle så roteres mellom spolene.

Kryostatene brukt i prosjektet er bygd opp som runde metallbeholdere. Disse er delt i to deler, en øvre og en nedre del. Mellom delene ligger det en O ring som sikrer at det kan opprettes vakuum i den. På toppen av beholderen er det et kjølehode av typen SUMITOMO RDK-408S, to 25 pins d-sub tilkoblinger, tilkobling for å føre strøm inn i kryostaten og to 100mm gjennomføringshull for vakuumbutstyr eller lignende. Innenfor metallboksen ligger det først 30 lag med superisolasjon, så en skjerm av kobber. Denne skjermen skiller et ytre og et indre rom.

I det ytre rommet skulle temperaturen ligge på 70-80K, mens i det indre skulle temperaturen ligge under 37K. Tykkelsen på skjermen er 2 mm. I toppen av det indre rommet entret to skjermede kabler a 25 ledere, to hts110 CS025030 superledende lederstaver med forbindelse til kobbertilkoblingene på kryostatens utside, oppheng for spolen og kaldhode for å kjøle spolen. Kryostaten er ikke symmetrisk siden den ene siden vil ligge mot bolten som skal varmes opp. Videre i rapporten blir siden mot bolten karakterisert som framsiden, mens siden som skal vende bort fra bolten karakteriseres som baksiden på kryostaten.

Lederstavene kjøles ned til 70-80K med en isolert kobberforbindelse til skjermen mellom ytre og indre rom, før de går inn i det indre rommet og skulle skjøtes med spolen. Opphenget til spolen bestod av to plater som ble skrudd fast i en turbax konstruksjon som spolen skulle hvile på. Kobberet som skulle kjøle og holde spole på plass bestod av to deler som dannet framsiden og baksiden på spolen, disse kobberdelene blir referert til som grenseflate en og to. Hvor grenseflate en er siden som vil vende mot bolten i den ferdige induksjonsovnen. Mellom grenseflatene var det 15 mindre kobberdeler som støttet og kjølte spolen. Grenseflatene hadde forbindelse til kaldhode gjennom et mellomstykket i toppen av spolen. Figur 2-1 viser kryostatens indre og ytre komponenter, bildene er tatt mot fremsiden av kryostaten.



Figur 2-1 Komponenter i det indre rommet (venstre) og i det ytre rommet (høyre)

På figuren er det en plate merket oppheng til spolen, en tilsvarende plate skulle festes på fremsiden av kryostatet. Figuren til venstre er tatt etter at spolen ble limt sammen, men er tatt med for å bedre overblikket.

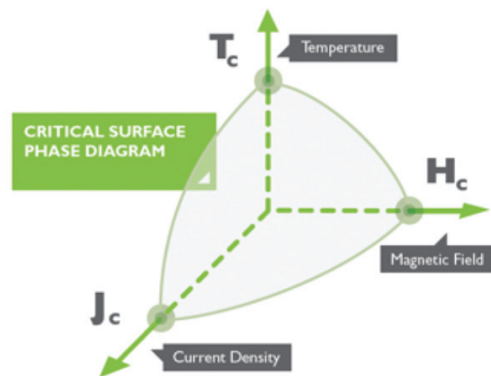
I forkant av prosjektet hadde superlederen blitt viklet til doble pannekake disker. Viklingen ble gjort på våren 2008. Arbeid som gjenstod og deler som måtte lages var: sammenliming av alle pannekakene og skjøting av superlederen, del for kjøling av skjøtene mellom diskene måtte lages, et system for å måle spenningen over skjøtene, forbindelse mellom spolen og superlederen måtte lages, et system for temperaturmåling, samt at kjølesystem og vakuumsystem måtte monteres

## 2.2 Superledere

Superledendematerialer har et stort fortrinn fremfor konvensjonelle kobberledere, det kan lede store mengder strøm uten tap. For at materiale skal oppnå denne superledende tilstanden må det kjøles til under en kritisk temperatur  $T_c$ . De første superledende materialene som ble oppdaget i 1911 hadde en  $T_c$  på 4,2K, mens en kontinuerlig forskning gjorde at man i 1986 hadde funnet materialer som var superledende ved temperaturer på over 77K. (2). Kjøling kunne dermed gjøres med billig flytende nitrogen fremfor dyr flytende helium. Superlederne funnet før 1986 kalles LTSL (lavtemperatur superleder), mens superledere av nyere dato kalles HTSL (høytemperatur superleder).

For at den superledende tilstanden skal opptre må materialet ligge under gitte grenser for temperatur, magnetfelt i materiale og strømtetthet. Disse parameterne er også innbyrdes avhengig av hverandre. (2) Ved temperaturer rundt  $T_c$ , kan ikke feltet være like høy som ved lavere temperaturer uten at superlederen mister sin superledende evne. Overgangen er

illustrert i Figur 2-2. Det skraverte område på figuren indikerer at lederen er innenfor grensene for temperatur, felt og strømtetthet.



Figur 2-2 Overgangen fra normaltledende tilstand til superledende tilstand for en leder (3)

Hvis temperaturen overstiger kritisk verdi på et sted på superlederen, vil punktet bli normalt ledende. Det vil da oppstå en effektutvikling i punktet som genererer varme. Varmen kan gjøre at større deler av superlederen blir normaltledende noe som igjen fører til mer varme og ytterligere oppvarming. Denne kaskadeeffekten kalles en quench.

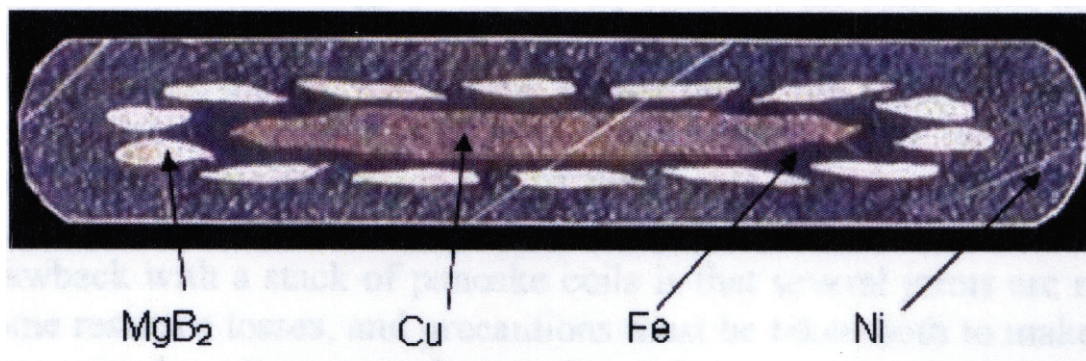
Superledere deles i to typer, 1 og 2. Disse skiller hovedsakelig etter hvordan magnetfelt innvirker på dem. Hvis en utsetter type 1 superleder for et konstant ytre magnetfelt, vil det genereres virvelstrømmer på overflaten. (2) Virvelstrømmene setter opp et magnetfelt som er motsatt rettet og like stort som det ytre magnetfeltet. Feltet som kommer utenfra forhindres dermed å trenge inn i superlederen. Overskrides grensen for det ytre magnetfeltet, penetrerer det ytre feltet superlederen, og superlederen går over til normaltledende tilstand. (2)

Type 2 superledere skiller seg fra type en ved at de ikke har en markant overgang mellom superledende tilstand og normalt ledende tilstand. De har et mellomstadium hvor deler av det ytre feltet penetrerer superlederen uten at superlederen mister sin superledende evne. Overstiger feltet i lederen en neste grense, mister superlederen sine superledende egenskaper slik som type 1. Type 2 superledere er vanligvis legeringer eller intermetalliske faser, mens det er flere rene metaller i type 1.

### 2.2.1 Superlederen brukt i ALUHEAT

Superlederen som ble brukt i prosjektet var av typen magnesiumdiboroid (MgB<sub>2</sub>). Denne superlederen har en superledende overgangstemperatur på 37K og dens superledende egenskaper ble oppdaget i januar 2001 (4). Overgangstemperaturen gjør superlederen attraktiv, da den kan brukes i konvensjonelle kryostater. Årsaken til at denne typen superleder ble brukt i prosjektet var lavere kostnader enn alternativene (BSCOO/Ag, YBCO eller andre HTSL). (1)

Selve superlederen fremstår som et bånd med høyde på 0,65mm og en bredde på 3,6mm. I båndet er det 14 superledende filamenter innsluttet i nikkell med en kobberkjerne. Kobberkjernen gir termisk stabilitet ved quench, ved at det har god ledningsevne. (1) Mellom kobberkjernen og nikkelmatriksen ligger det i tillegg et skille av jern. (1) Jernlaget sørger for at ikke kobberet forurenses de superleder filamentene. (5) Figur 2-3 Viser tverrsnittet av superlederbåndet. Superlederen ble isolert med en polyimidfilm før den ble viklet. Filmen kan motstå flere kV. (1)



Figur 2-3 Tversnitt av MgB<sub>2</sub> superlederbånd (1)

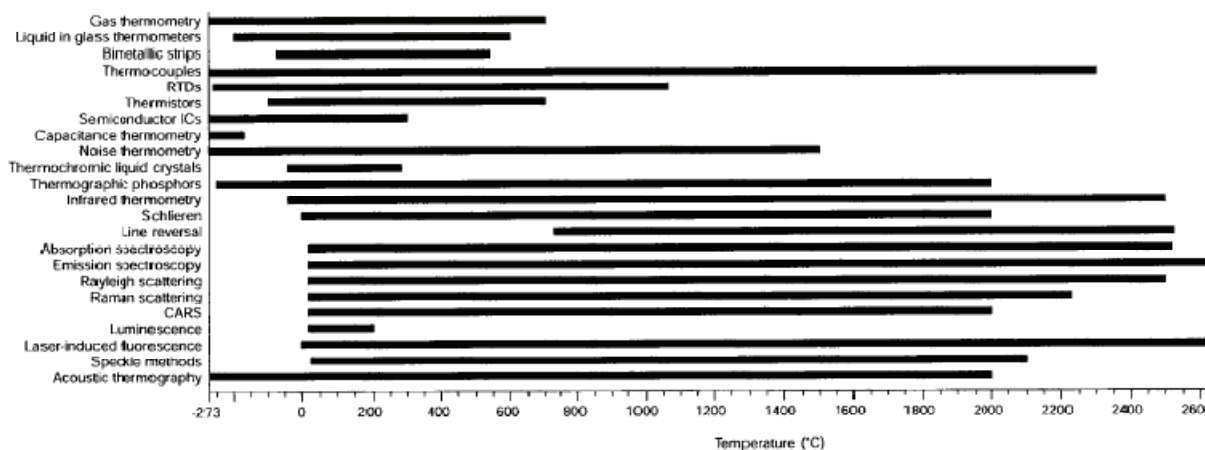
Samlet tversnitt for superlederne er ca  $0,21\text{mm}^2$ , noe som tilsvarer 9 % av båndtverrsnittet. (5) Nikkeltverrsnittet er på  $1,54\text{mm}^2$ , jerntverrsnittet er på  $0,19\text{mm}^2$  og kobbertverrsnittet er på  $0,35\text{mm}^2$ . Superlederen er produsert av Clombus Superconductors, og produksjonen er gjort med pulver i rør metoden. (5) Som i hovedsak går ut på å fylle magnesiumdeboroid i jern rør, røret blir så strukket og bakt på  $900^{\circ}\text{C}$ . I spolen som ble brukt i ALUHEAT prosjektet ble det viklet 32 mindre spoler med en dobbel pannekake konstruksjon, hvor det først ble viklet 75 tørns innover på 75 tørns utover for hver disk. Hver disk hadde en superledertlengde på 550m, og det skulle skjøtes 16 disker til hver spole. Diameteren på diskene var på ca 1,1m. Figur 2-4 viser 16 doble pannekakedisker før de ble montert i spolen.



Figur 2-4 16 viklede doble pannekake spoledisker

### 2.3 Temperaturmålinger

Det er avgjørende at ikke temperaturen overstiger 37 kelvin på noe punkt langs superlederen. Overstiges denne temperaturen vil superlederen bli normalledende noe som betyr motstand og varmeutvikling. For å holde oversikt over temperaturen ble det brukt temperaturfølere på utvalgte steder i på spolen. Det finnes mange metoder for å måle temperatur, men temperaturområdet på metodene varierer mye. Figur 2-5 viser hvilke temperaturområder de forskjellige målemetodene har.



Figur 2-5 Temperaturområdet for forskjellige målemetoder (6)

Aktuelle målemetoder for bruk i kryostater er motstandselement (RTD) og termoelementer (thermocouple). Begge disse metodene kan brukes i temperaturområdet kryostaten opererer i. I motstandselementer er det endringen av den elektriske motstanden i materialet som brukes som mål på temperaturen. Motstandsendingen kommer av amplituden til de termodynamiske vibrasjonene til atomkjernen. (7) Giveren kan enten være en metalltråd som vikles opp på en stamme av stabilt materiale, eller i form av en tynn film. Metaller som brukes er nikkel, kobber, platina eller rhodium – jern (7). Renheten til metallet har betydning på hvor nøyaktig elementet blir.

Giverne lages med standardresistans ved 0 grader. Platina har vist seg å være det mest egnede metallet, og lages i PT 100 elementer (platina element med 100 ohm ved 0 grader (8)). Disse kommer som keramisk element, glasselement, filmelement eller mantelelement. Filmelementet er nytt og er det rimeligste alternativet. Følerens innstikklengde er vesentlig for målenøyaktigheten, og en regel er at innstikklengden bør være 15 ganger følerdiameteren, slik at ikke målingen blir påvirket av temperaturer utenfra. (9)

Alle PT100 elementer har en forskjell i målingen ved økende og minkende temperatur. Denne forskjellen kalles hysteres, og filmelementet har størst hysteres. Elementene har i tillegg en viss tidskonstant (tiden for elementet til å oppnå 63 % av verdiendringen i et sprang), som er høyere på PT100 elementer enn på termoelementer. (9)

Usikkerheten for RTD elementer avhenger av kalibreringen gjort av elementet. Usikkerheten knyttet til målinger gjort med RTD kan under normale omstendigheter kalibreres til  $\pm 0,2^\circ C$ . (6) Resultatene kan påvirkes av en rekke faktorer som selvoppvarming, korrosjon og strekk av motstandselementet. Selvoppvarming skjer hvis målestrømmen gjennom elementet blir for stor og det blir varmeutvikling i selve elementet.

Termometre som bygger på termoelementer består av to ledere av forskjellige materialer sammenkoblet i et målepunkt med temperatur  $T_1$ , og et voltmeter i motsatt ende ved temperatur  $T_2$ . Spenningen som måles på voltmeteret er da et mål på temperaturforskjellen mellom temperatur  $T_1$  og  $T_2$ . Målingen blir dermed påvirket av temperaturen på terminalene til måleinstrumentet, men nesten alle instrumenter og måleverdiomformere har en innebygget referansepunktjustering. Dette betyr at en varierende omgivelsestemperatur ved referansepunktet automatisk blir korrigert. (9) Termoelementer blir ikke påvirket av temperaturgradienter langs lederne. (6)

Termoelementene bygger på tre effekter; Seebeckeffekten, peltiereffekten og Thomseffekten. Seebeckeffekten er en elektromotorisk kraft som oppstår i en leder ved varmetransport i lederen, og kommer av elektronbevegeleser ved varmetransport. (6) I praktiske termoelementer er bidraget fra Thomson og Peltier effekten ubetydelig. Amplituden på den elektromotoriske kraften (emf) som oppstår er en funksjon av temperaturforskjellen mellom lederne og materialet i lederen. Seebeckkoeffisienten er et mål på hvordan elektronene er koblet til strukturen i lederen. (6) Seebeckeffekten er gitt av ligning (1.1)

$$S(T) = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\Delta T} = \frac{dE}{dT} \quad (1.1)$$

I ligningen er S Seebeckkoeffisienten,  $\Delta T$  er temperaturforskjellen mellom lederens endepunkter og  $\Delta E$  er den absolutte Seebeckeffekten i uV. Emf utviklet av termoelementene er uavhengig av lengden og diameteren på termoelementene, det er kun temperaturforskjellen mellom T1 og T2 som har innvirkning. Ved å løse ligningen med hensyn på  $\Delta E$  og integrere mellom temperatur T1 og T2, kan ligning (1.1) skrives som ligning(1.2).

$$E = S_{AB}(T_2 - T_1) \quad (1.2)$$

Fra ligningen kan det leses at emfen kun er avhengig av T1 og T2. Innføres det et annet materiale mellom terminalene på voltmeteret og den frie enden til termoelementene, flyttes referansepunktet fra terminalene på voltmeteret til grenseflaten mellom termoelementene og det innførte materiale. Dette muliggjør en flytting av referansen fra voltmeterterminalene til en kjent referanse, for eksempel isvann eller flytende nitrogen. Termoelementene er delt inn etter hvilke materiale som er satt sammen, de vanligste typene er gitt i Tabell 2-1 med tilhørende temperaturområde.

**Tabell 2-1 Temperaturområde for forskjellige termoelementer (6)**

Type	Temperaturområde(grader celsius)
B	100-1750
E	-268-800
J	-196-700
K	-250-1100
N	0-1250
R	0-1600
S	0-1500
T	-262-850

Det er opprettet standardiserte tabeller over emf for de forskjellige termoelementene ved gitte temperaturer. Endringen av emf per grad avtar ved minkende temperatur. For eksempel vil et termoelement av typen E gi en signalendring på 58,7 uV/°C ved 0°C, mens signalendringen er 1,6 uV/°C ved -270°C. Dette stiller høye krav til loggerutstyr ved lave temperaturer. Usikkerheten til termoelementer er normalt høyere enn for RTD elementer, men med kalibrering kan den komme ned på ±0.5°C. (6)



### 2.3.1 Valg av temperaturfølere

Aktuelle elementer for måling av temperatur var motstandselement og termoelement. Det ble undersøkt priser på aktuelle motstandselement, og disse var høye. For et motstandselement anbefalt av produsent Lakeshore var prisen 1500 Kr uten moms. Dette gjorde at valget falt på termoelementer som ble billigere, på tross av at det fra noen kilder hevdes at termoelementer ikke egnes i kryogeniske temperaturer (10). Andre kilder hevder termoelementer fungerer, men må kalibreres på stedet siden blant annet strekk i elementene kan påvirke målingene (11).

Termoelement type T og E er begge upåvirket av magnetiske felt, E er i tillegg mindre termisk ledende enn T. Begge disse elementene kan også brukes for gitte temperaturer (6). Ved NTNU ble det imidlertid utelukkende brukt termoelement K og T, noe som gjorde at valget falt på type T. Type T termoelement ble også brukt av Johan K. Skjøelberg i (12), og gav da rimelige resultater. Det ble også vurdert å bruke enten kobbertråd eller platina tråd og registrere endringen i motstand. Av tidsmessige årsaker ble ikke dette videreført. Ulempen med termoelementer er behovet for en referansetemperatur.

## 2.4 Spenningsmålinger

Våren 2008 gjorde Frode Sætre forsøk for å finne den beste metoden for å skjøte superledere. Skjøtene i superlederen er avgjørende da strømmen i skjøtene må gjennom et normalledende lag. Motstanden i dette laget er konstant ved konstant temperatur. Spenningen over skjøten vil derfor følge en lineær karakteristik, hvor spenningen øker ved økende strøm. Motstanden kan overvåkes ved å måle strømmen gjennom spolen og spenningen over skjøten samtidig. For å finne motstanden i skjøten for det superledende materiale må motstanden som følge av det normalledende materialene trekkes fra.

Holdes superlederen innenfor sine tre kritiske grenser, skal det ikke være noe spenningsbidrag fra superlederen over skjøten. Hvis spenningen over skjøten avviker fra den lineære karakteristikken til de ikke superledende materialene, er dette en indikasjon på at superlederen har gått over i et mellomstadium. For superlederen er det avgjørende at motstanden i skjøten ikke overstiger grensen for superledende materialer på  $1\mu\Omega/\text{cm}$  (13).

Blir motstanden for høy vil dette føre til varmeutvikling som igjen kan spre seg utover langs superlederen og gi en quench. Formålet med spenningsmålingene er derfor å både sjekke motstanden over det normalledende materiale i skjøten og ha en kontinuerlig oversikt over superlederen i skjøten. Under testing av spolen vil strømmen økes sakte og spenningen over skjøtene vil da øke lineært så lenge ikke superlederen går i quench.

I tillegg til skjøtene er det også viktig i måle spenningene over de individuelle diskene. Hvis det skulle skje feil med disse, vil ikke det bli registrert over skjøtene. Spenningen over diskene vil imidlertid være sterkt avhengig av endringer i strømmen. Under oppramping og nedramping av strømmen vil det induktive spenningsbidraget i hver disk være betydelig. Dette kommer av spolens egenskaper og er dokumentert i Faradays lov. Det kan utledes til formelen gitt i (1.3).

$$V = -L \frac{di}{dt} \quad (1.3)$$

Under målinger av spenningene over diskene er det derfor viktig å følge trender av alle spolene for å se om noen skiller seg ut.

## 2.5 Varmeledning

I kryostaten er det avgjørende at temperaturen ligger under  $T_c$  for superlederen. Varmeoverføringen fra omgivelsene må derfor begrenses. Varme kan bli overført gjennom tre mekanismer; varmeledning, varmestrømning eller varmestråling. I kryostaten var det superisolasjon i det ytre kammeret som ville stoppe strålingsvarmen fra omgivelsene. Kryostatene skulle i tillegg være tett og under vakuum, noe som begrenser varmestrømningen fra omgivelsene. Varmeledningen til alle ledere som gikk inn i kryostaten ville imidlertid bidra til en økt temperatur.

Blir varmeledningen for stor vil, ikke temperaturen komme under  $T_c$  og spolen oppnår ikke superledende tilstand. Varmeledningen er gitt av (1.4), formelen er hentet fra (14).

$$H = \frac{dQ}{dt} = k \cdot A \cdot \frac{T_H - T_c}{L} \quad (1.4)$$

I formelen er  $H$  energi over tid (j/s eller W), og gir uttrykk over hvor mye varme som overføres gjennom en leder over tid.  $k$  er den termiske ledningsevnen til materialet og er avhengig av temperaturen.  $A$  er arealet av et snitt av lederen,  $l$  er lengden og temperaturene  $T_H$  og  $T_C$  angir temperaturforskjellen. I kryostaten er det tre hovedkilder til varmeledning; strømlederne, ledere for spenningsmåling og ledere til temperaturmåling. Disse kildene må forankres godt i kryostaten for at ikke varmen skal bli ledet til superlederen.

Den termiske ledningsevnen endres ved endret temperatur, noe som må tas hensyn til under beregningene. For å finne den termiske ledningsevnen ble det integrert ved bruk av trapesmetoden. Metoden ble også brukt av Johan K. Skjølberg i hans masteroppgave. (12) Integrasjonen gjøres da fra  $T_c$  til  $T_H$  over alle  $k$ . Ved å bruke denne metoden går formel (1.4) over til formel (1.5).

$$H = \frac{A}{L} \cdot \int_{T_c}^{T_H} k \cdot dk \quad (1.5)$$

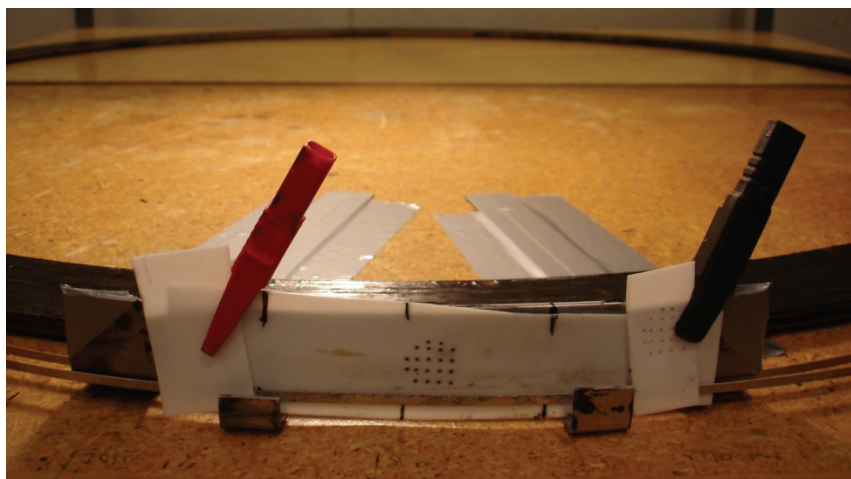
### 3 Montering av spolen

I påfølgende delkapitler vises alle delene som ble konstruert, samt fremgangsmetodene brukt for å sette sammen spolen.

#### 3.1 Skjøting av spoledeler og sammenliming

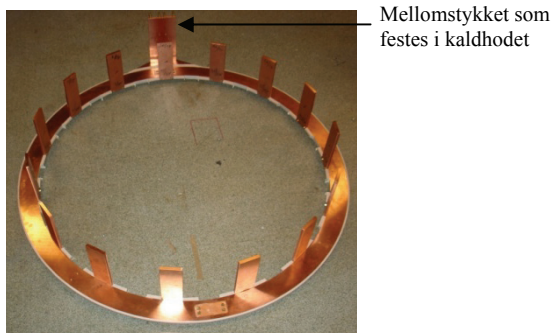
Hver spole består av 16 separate doble pannekaker. Dette betyr at spolen er laget av 16 separate spoledeler som alle er viklet først 75 vindinger innover, så 75 vindinger utover. Hver doble pannekake hadde to ender som ble spleiset til henholdsvis en disk over og en under. Ytterste og innerste disk skulle spleises med lederstavene på kryostatet. Spleisingen mellom diskene ble gjort ved først å fjerne isolasjonen på området som skulle spleises. Området ble så pusset med sandpapir (grovhetsgrad 180). Det ble så vasket med aceton, og påført loddepasta (Deca flux: Pincel Ecogel). Laget med loddepasta ble lagt så tynt som mulig for at det ikke skulle påvirke motstanden i skjøten.

Loddetinn ble lagt i et tynt lag til sist. Tullet som ble brukt var produsert av Multicore og hadde en sammensetning på 50 % tinn, 48 % bly og 2 % kopper. Dette tullet var ikke likt det som ble brukt under skjøtetestene gjort av Frode Sætre våren 2008. Tullet som da ble brukt hadde en sammensetning på 50 % tinn, 48,5 % bly og 1,5 % kopper, forskjellen antas å ha liten innvirkning. Smeltepunktet på tullet er 185-215 grader celsius. Figur 3-1 viser en disk hvor den ene enden er påført tinn. Skjøtene ble planlagt å ligge ca 3 cm fra resten av spolen. Dette ble gjort for å gjøre spleisingen enklere og for å muliggjøre ekstra kjøling ved å lime dem til en kobberdel som hadde god termisk kontakt med kjølehodet.



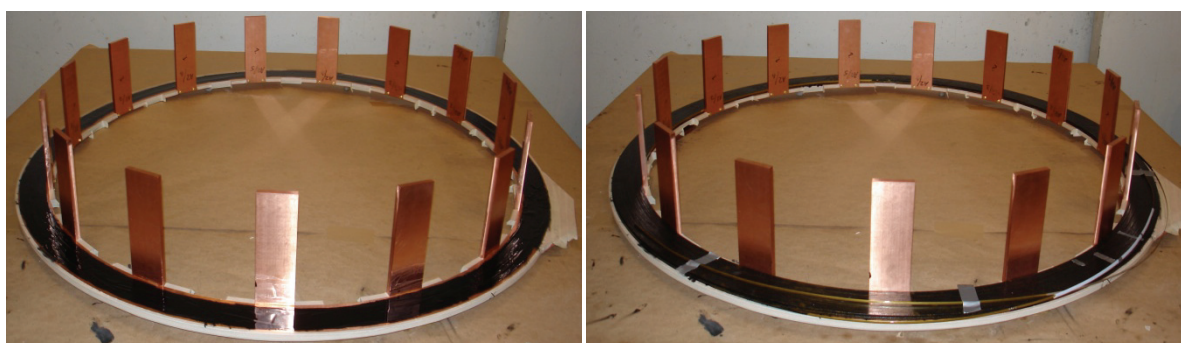
Figur 3-1 Spole ende påført tinn

På Figur 3-1 vises også metoden som ble brukt for å holde tapen i ro ved pussing, vasking og tinnpåføring. Klemmene sikret at tapen lå i ro. 22,5 cm fra midten på skjøten ble et lite område klargjort for spenningsmåling ved å avisolere, pusse og påføre loddetinn. Etter tullet var påført ble spolediskene limt til kobbergrenseflaten nærmest bolten (grenseflate en). Grenseflaten sørget for at spoledelene ble holdt på plass og skikkelig nedkjølt. Grenseflate en er vist i Figur 3-2.



Figur 3-2 Grenseflate en.

Den første doble pannekaken ble limt direkte på kobberet. Spolen ville dermed komme så nærme boltene som mulig. Limingen ble gjort ved å påføre kontaktflatene mellom spoledisken og kobberet et lag epoksy av typen Stycast 2850 FT med herder Catalyst 24 LV, både herder og epoksy produsert av Emerson og Cuming. Figur 3-3 viser kobberdelen påført epoksy.



Figur 3-3 Kobberdel påført epoksy til venstre og med den første disken montert til høyre. Diameteren er ca 1,1m.

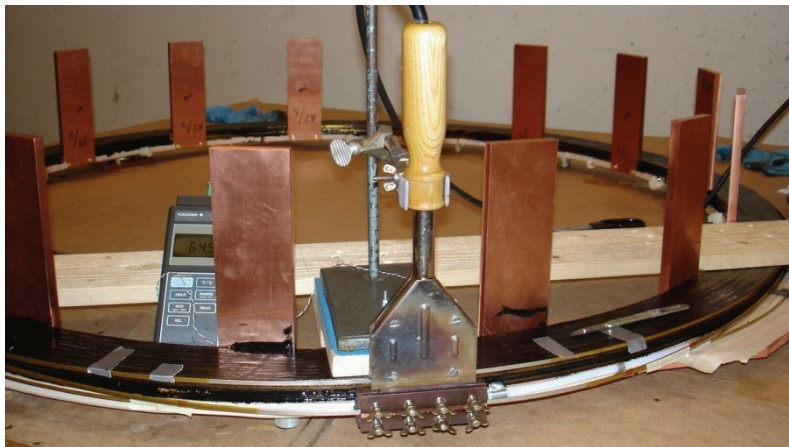
Deler av grenseflaten ble i forkant dekket av maskeringstape for å kunne fjerne overskuddsepoksy. Endene til disken ble midlertidig tapet opp på disken, og skjermet med et plastrør. Neste disk ble behandlet som den første og limt fast til den underliggende. Under limingen ble det lagt vekt på å ha rikelig med epoksy mellom diskene og å sørge for at det kom epoksy mellom støttepinnene og diskene. Sammenspleisingen av superlederne ble gjort ved å bruke verktøyet konstruert av Frode Sætre i 2008, vist i Figur 3-4. Verktøyet varmer opp skjøtene og holder dem på plass samtidig som det legger et uniformt press på hele skjøteflaten. Temperaturen ble også overvåket under oppvarmingen.



Figur 3-4 Spleiseverktøy for diskene

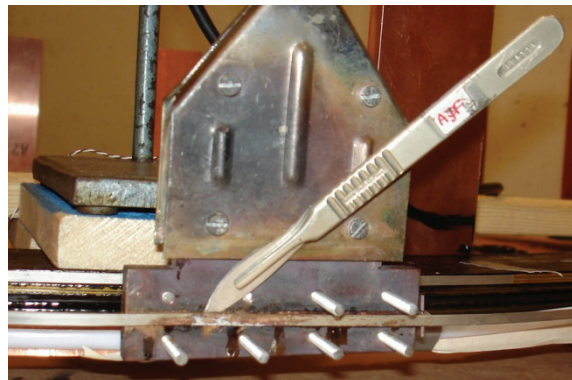
Skjøtene ble satt til venstre sett fra fremsiden, ca 50 cm fra toppen av spolen. Dette gjorde at de i etterkant kunne limes til en plate med forbindelse til kaldhode, for ekstra kjøling.

Varmen som oppstod som følge av motstand i skjøtene ville dermed ledes bort. Bilde i Figur 3-5 er tatt under den første skjøtingen. Skjøten ble varmet opp til mellom 260 og 270 grader celsius og avkjølt.



Figur 3-5 Skjøting av de første diskene

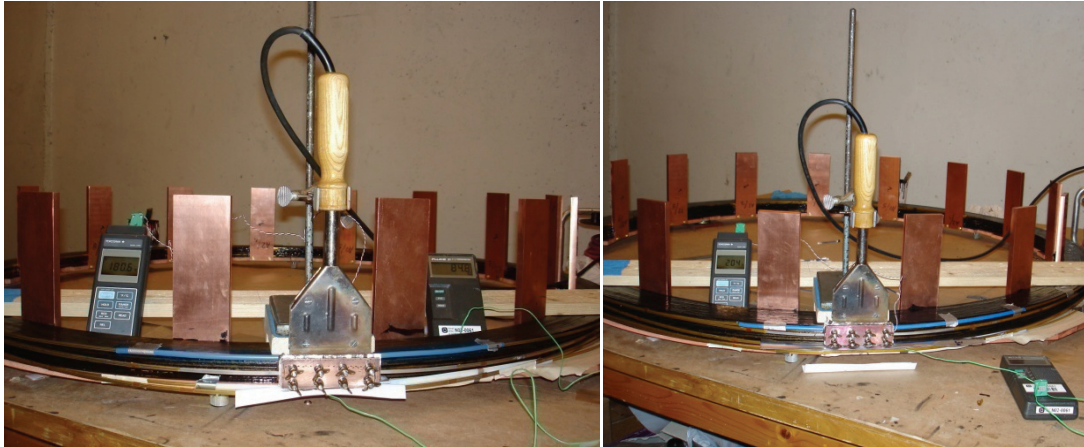
Fjerning av loddeverktøyet ved den første skjøten bød på problemer, da skjøten hadde festet seg til loddeverktøyet. For å få løsnet skjøten ble det brukt en skalpell, som ble lirket mellom skjøten og kobberet til loddeverktøyet. Figur 3-6 viser hvordan dette ble gjort.



Figur 3-6 Separering av loddeverktøy og skjøt nr 1

Årsakene til problemet var uklare, men kan ha vært feil bruk av loddepasta, for høy temperatur eller rester av tidligere testskjøter på loddeverktøyet. For å unngå videre problemer ble kobberet på loddeverktøyet pusset, og det ble brukt aluminiumsfolie mellom skjøten og loddeverktøyet på de påfølgende skjøtene.

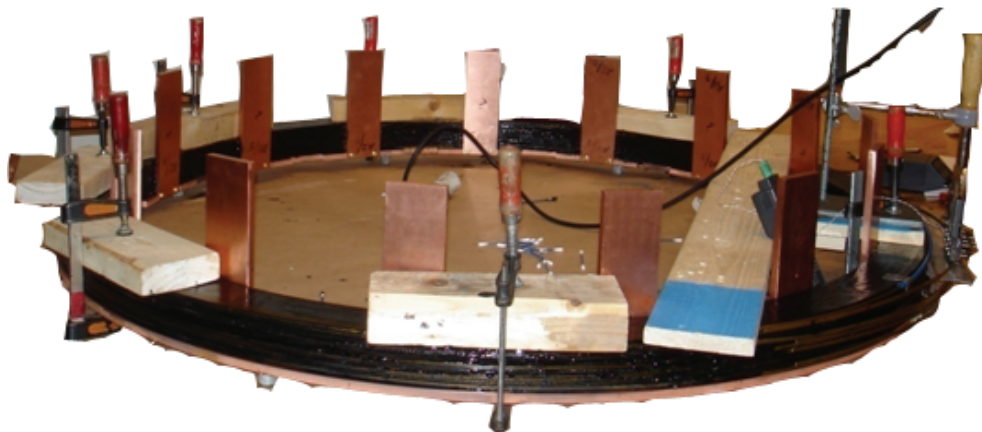
Under videre skjøting kunne loddebolten smelte underliggende skjøter. Tapen har en bredde på 8mm, noe som gir en klaring på 8mm mellom hver skjøt i loddrett retning. Det ble prøvd forskjellig skjermingsmetoder, og en 0.3mm aluminiumsfolie som ble lagt mellom skjøten under og loddeverktøyet ga best skjerming. Den høyeste temperaturen målt på undersiden av aluminiumsfolien var 72 grader celsius, da hadde loddeverktøyet en temperatur på 261 grader celsius. Figur 3-7 viser skjøting nr. 2 og 3.



Figur 3-7 Skjøt 2 til venstre og skjot 3 til høyre

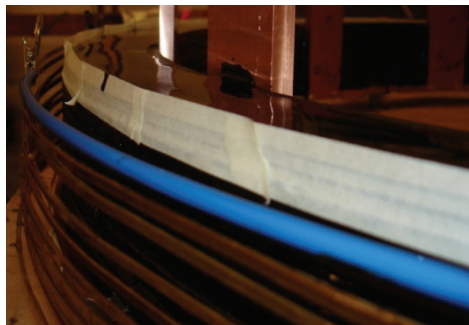
Skjøtene ble isolert med kaptontape for at ikke de skulle komme i elektrisk kontakt med kobberplaten som skulle kjøle dem. På den femte disken oppstod det problemer, den la seg ikke helt ned på disken under. Løsningen var å sette på tvinger for å sikre at disse diskene ble presset sammen.

Figur 3-8 viser dette.



Figur 3-8 Spoleskjøting og bruk av tvinger for å unngå avstand mellom spoledelene

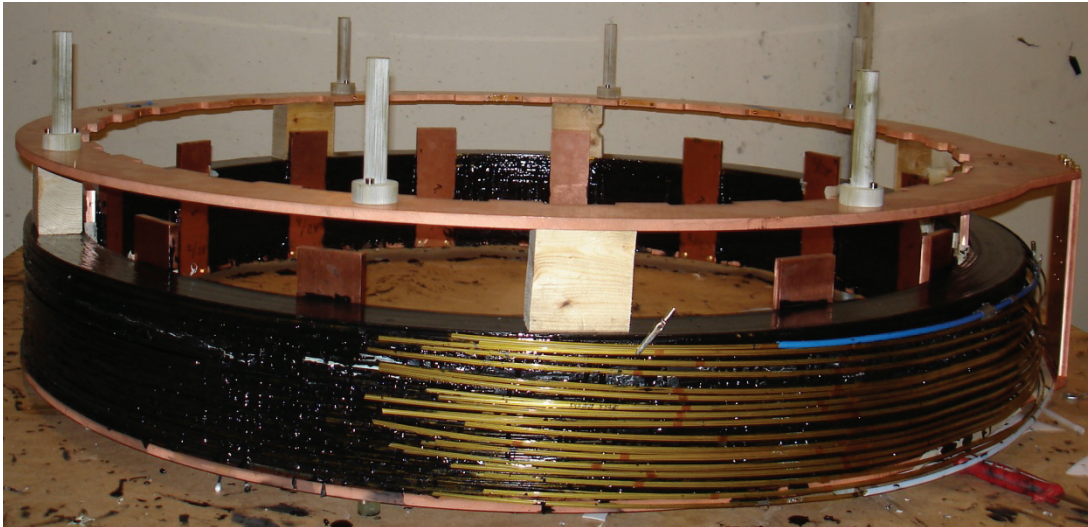
På de siste diskene ble det lagt på 900g epoksy mellom pannekakene. De tykke epoksy lagene ville jevnet ut ujevnheter i spolen. Tvinger ble ikke brukt, men det ble laget en forskalingskant av maskeringstape for å hindre at epoksyen ble presset ut mellom diskene. Figur 3-9 viser epoksy laget og forskalingen.



Figur 3-9 Tape forskaling brukt under skjøting av disker

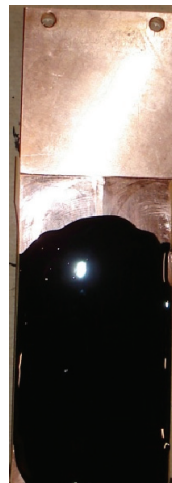
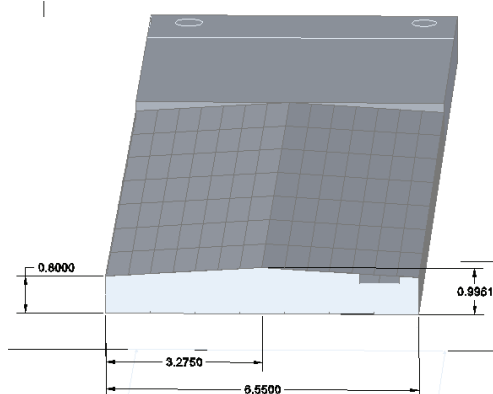
### 3.2 Montering av grenseflate 2

Grenseflate nummer to ble limt på spolen over grenseflatedel 1. Selve delen er lik del en, men plasseringen av støttene var lagt slik at de sentreres mellom støttene på grenseflate 1 ved montering. Det skulle i tillegg monteres et avstandsstykke mellom grenseflatene som ble skrudd fast til kaldhode. Avstanden mellom den første og den siste disken var 14,5 cm, mens avstandsstykket har en lengde på 23,5 cm. Det ble derfor brukt blokker i tre for å holde grenseflatedel 2 i riktig avstand fra spolen under liming. Under monteringen ble støttene først demontert fra del 2 for å sikre at de ikke kunne skade spolen. Figur 3-10 viser monteringen før støttene ble montert.



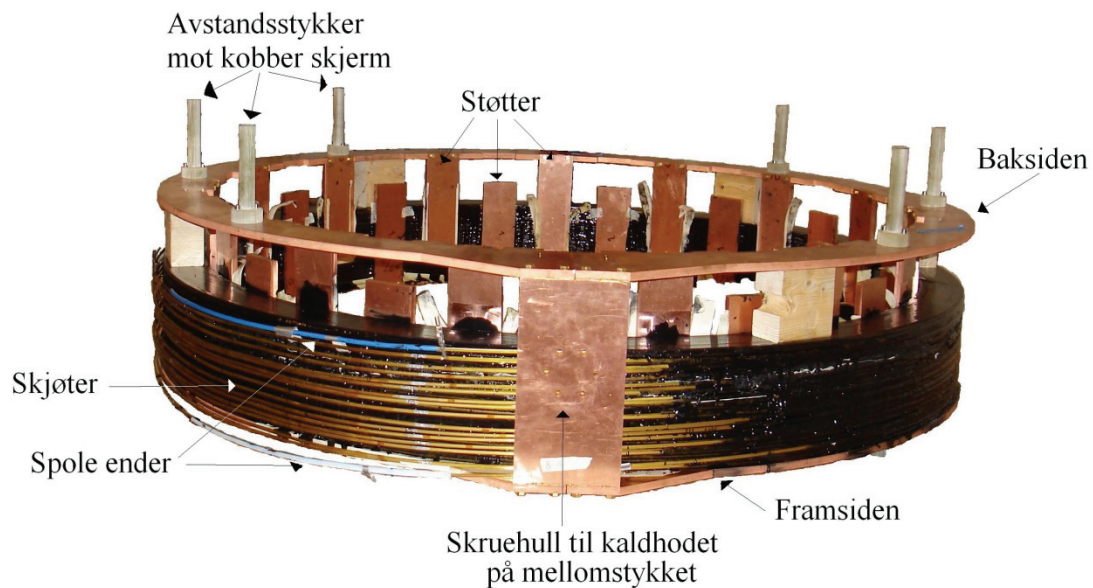
Figur 3-10 Montering av grenseflate 2, bilde tatt før montering av støtter

Kantene på støttene ble slipt for å sikre at de ikke kunne skade spolen. Dette ble gjort ved å ta bort 2 mm på sidene langs støttene og 0 mm på midten. Figur 3-11 Viser støttene etter modifikasjonene. Det øverste partiet kom ikke i kontakt med diskene, og ble derfor ikke modifisert.



Figur 3-11 Støtter etter endring (venstre), og støtter påført epoksy (høyre)

Støttene ble montert ved å legge et lag Stycast epoksy på den delen som kom i kontakt med diskene for så å skru dem fast i grenseflate 2. Det ble brukt maskeringstape for å sikre at ikke epoksyen rant ut under montering. Støttene skal sikre god avkjøling av diskene, det ble derfor etterfylt med epoksy for å sikre god termisk kontakt mellom diskene og støttene. Figur 3-12 viser spolen med alle støttene montert.



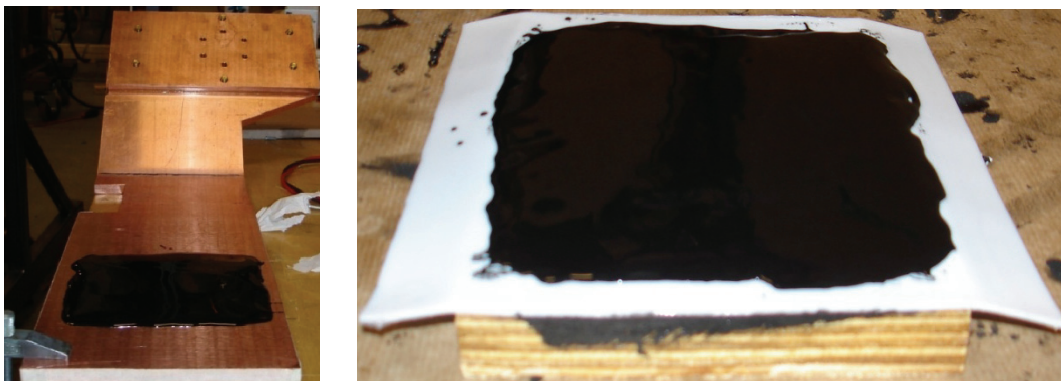
Figur 3-12 Spolen med alle støttene montert. Kjølhode festes til det rektangulære mellomstykket midt på bilde.

### 3.3 Kjøling av skjøtene

I skjøtene vil det utvikles varme da strømmen passerer et tynt lag med tinn og må gå gjennom superledertapens ytre nikkellag. For å hindre at temperaturen ble for høy i skjøtene, ble det laget en del som satte skjøtene i god termisk kontakt med kaldhode. Delen ble laget i samme kobber som er brukt ellers i oppsettet, og er helt luftfri. Målene for delen som ble laget er gitt i Vedlegg 6. Vedlegg 7 viser delens plassering på spolen.

Platen ble festet til mellomstykket mellom grenseflatene med 6 skruer på 6mm. Det ble også lagt et tynt lag med APIEZON N fett mellom kjøleplaten og mellomstykket. Fettet sikret god termisk kontakt mellom platene. Vedlegg 7 viser at kjøleplaten skulle ligge ca 3cm utenfor selve spolen, og maksimalt ha en kontaktflate på 16 cm med skjøtene. Selve skjøtene er på ca 10 cm. Montering av kjøledelen ble gjort ved først å påføre område på kjøledelen som skulle være i kontakt med skjøtene epoksy av samme type brukt under skjøtingen. Delen ble så skrudd fast i avstandsstykket.

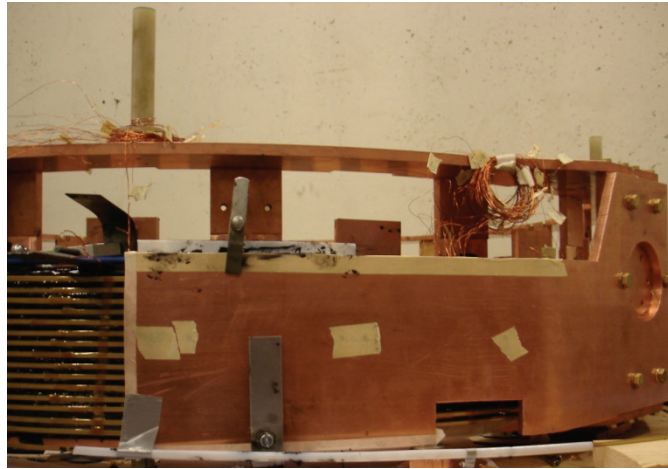
Limingen av skjøtene på kjøleplaten ble gjort ved å lage en plate som presset skjøtene mot kjøleplaten. Både pressplaten og kjøleplaten ble påført et lag STYCAST epoksy. Figur 3-13 viser delene før montering.



Figur 3-13 Kjøledel påført epoksy (venstre) og del for press av skjøter (høyre)



Pressplaten ble laget ved å lime en teflonplate på en treplate. På teflonplaten ble det først påført et lag med slippmiddel for å sikre at platen ikke ble limt på skjøtene. Pressplaten var 12,5 cm bred, og presset mot kjøleplaten med to skrutvinger. Figur 3-14 viser kjøledelen og skrutvingen som ble brukt under limingen.

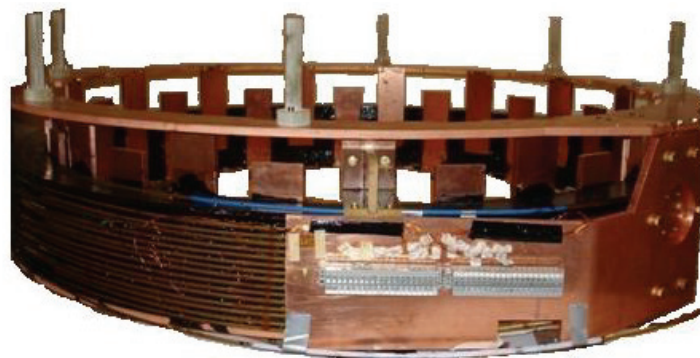


Figur 3-14 Sammenliming av skjøtene

### 3.4 System for spenningsmåling

For å overvåke motstanden ble det lagt inn spenningsmålingspunkter over alle skjøtene. Det ble i tillegg lagt målepunkter over kobberdelene som skjøter superlederen i spolen med lederstaven som fører inn strømmen. I spolen var det 15 skjøter mellom diskene og 2 skjøter mellom spolen og lederstavene. Det ble festet lakkisolerte ledere med en diameter på 0,28mm på hver side av skjøtene og på stavene som går ut av kryostaten.

På spolen ble lederne loddet med loddetinn likt det brukt under skjøting, mens på lederstavene ble lederne limt med sølvepoksy. Lederne ble avkjølt ved å lime dem til skjøtekjøledelen. Dette ble gjort med epoksy av samme type brukt under Kap 3.1. For å gjøre systemet så funksjonelt som mulig ble lederne koblet til rekkeklemmer slik at kablene som fører ledere inn i kryostaten kunne kobles fra lederne til skjøtene. Rekkeklemmene ble montert på en skinne på kjøledelen for skjøtene. Figur 3-15 viser systemet ferdig montert.



Figur 3-15 Spolen med spenningsmålesystemet montert

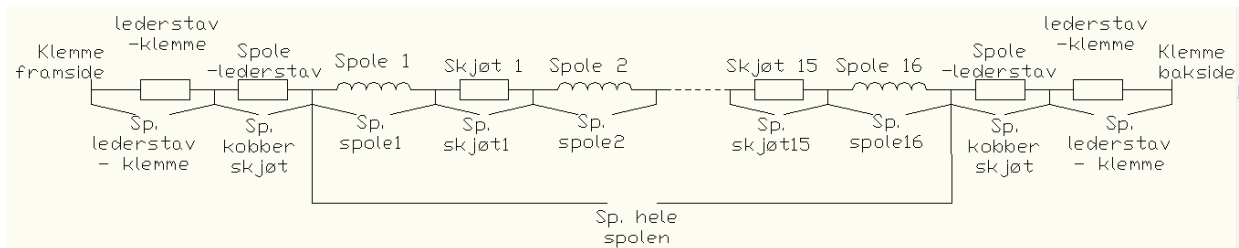
Systemet som skulle ligge utenfor kryostaten ble konstruert ved å bruke en kabel, to 25pin d-sub han kontakter og to 20 kanals multiplexerkort til bruk i en Agilent datalogger. I tillegg til leder for spenningsmåling, ble det montert ledere for strømtilførsel til cernox sensoren fre temperaturmålesystemet. På Figur 3-16 vises det eksterne spenningsmålesystemet. De svarte

og røde kontaktene nærmest d-sub kontaktene går til cernox sensoren, mens de svarte og røde kontaktene nærmest loggerkortene går til spenningsmåling på klemmene til kryostaten.



Figur 3-16 Det eksterne spenningsmålesystemet

Av de 50 tilgjengelige kobberlederne som gikk inn i kryostaten, ble 38 brukt til målinger. Varmedeiningen for disse er regnet ut i Vedlegg 5 og er på 850mW. Dette setter krav til den termiske forankringen til lederne. Totalt ble det logget 36 spenninger over spolen under testingen. Dette var 15 skjøter mellom diskene, 2 skjøter mellom spolen og lederstavene, en spenningsmåling over hver disk (16 til sammen), spenningen over hele spolen fra enden på baksiden til enden på framsiden og spenningen fra nederst på lederstavene til klemmene på kryostaten. Figur 3-17 viser plasseringen og Vedlegg 8 viser merkingen på alle lederne på hele systemet. Etter at systemet ble montert, ble spolen festet til kryostaten.

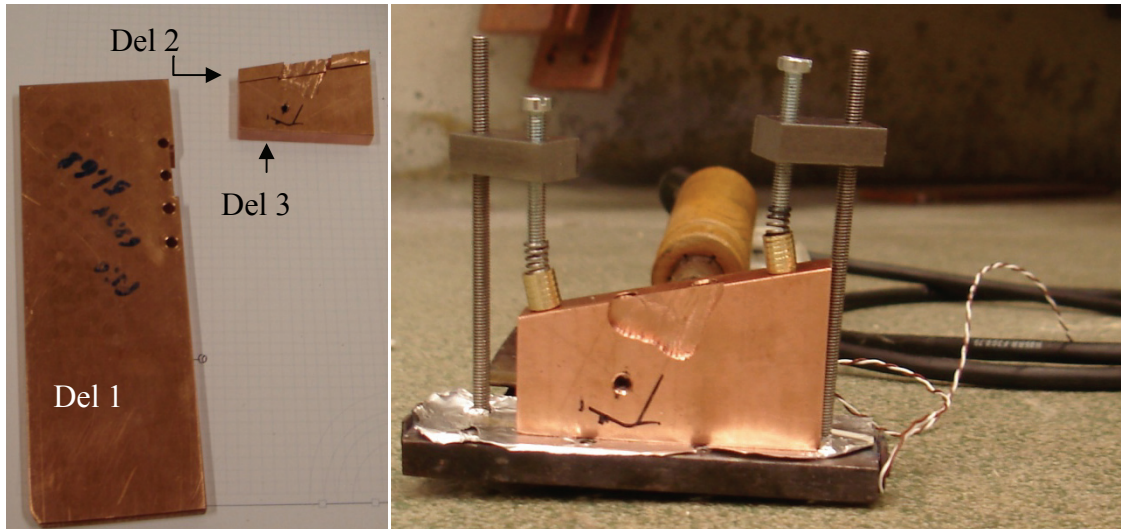


Figur 3-17 Plassering av spenningsmålingspunkter

### 3.5 Sammenkobling av spolen og lederstaver

Kryostaten ble levert med ledere som skulle kobles til spolen. Lederne var av produsert av HTS-110 og hadde betegnelsen CS025030. Disse består av høytemperatur superledere, og er dimensjonert for en strøm på 250A ved 64K (15). Dimensjonene er gitt i Vedlegg 9. For å koble lederne sammen med resten av spolen, ble det laget en skjot på hver side som sørget for både elektrisk kontakt mellom spolen og lederpinnene og god termisk kontakt mellom kobberet og kjøledelen for skjøtene.

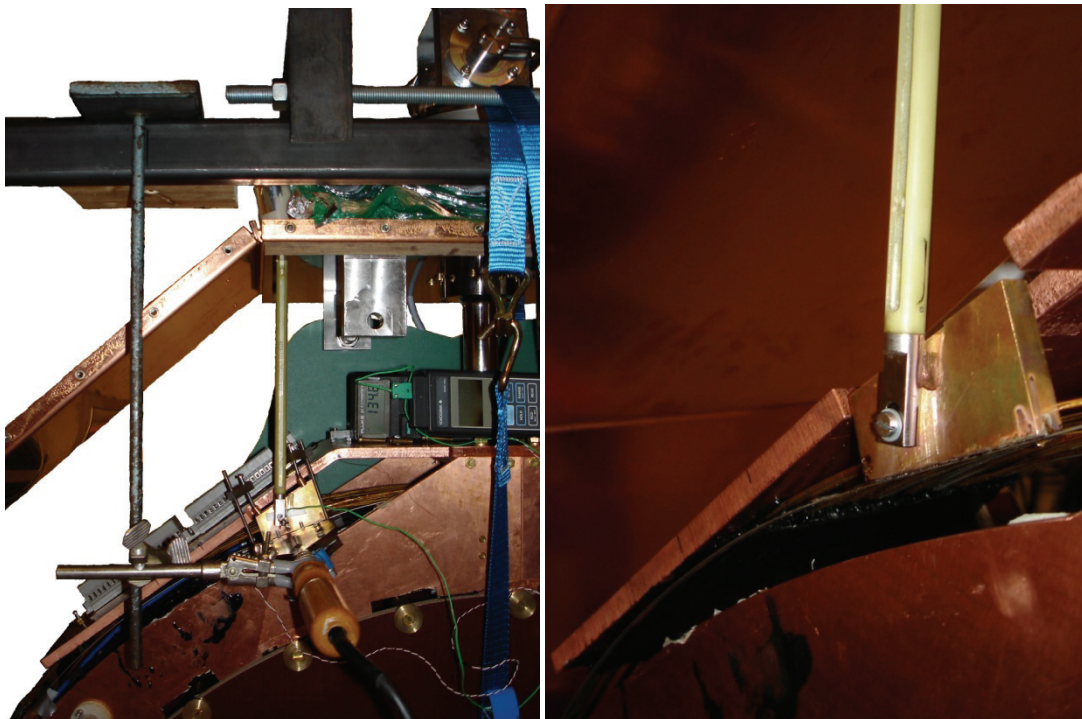
På fremsiden ble sammenkoblingen gjort ved å sette sammen tre mindre kobberdeler. De sørget for at avstanden mellom lederpinnen og superlederen i spolen ble kort mens de praktiske utfordringene med hensyn på plass ble en avgjørende faktor for utformingen av delene. Dimensjonene av delene er gitt i Vedlegg 10, og Figur 3-18 viser delene. Del 1 er en stor plate som legges oppå platen som kjøler skjøtene. Denne sikret kjøling av kobberskjøten. Delen ble limt fast med Stycast epoksy, og isolert fra kjøledelen med kapton tape. Del to er et avstandsstykke som gir kobberskjøten rett posisjon i forhold til HTS lederen. Del 3 gir forbindelse mellom spolen og HTS-110 lederen.



Figur 3-18 Deler for sammenkobling av spole og HTS leder på fremsiden(venstre) og verktøy for å lodde kobberdel 3 på spolen (høyre)

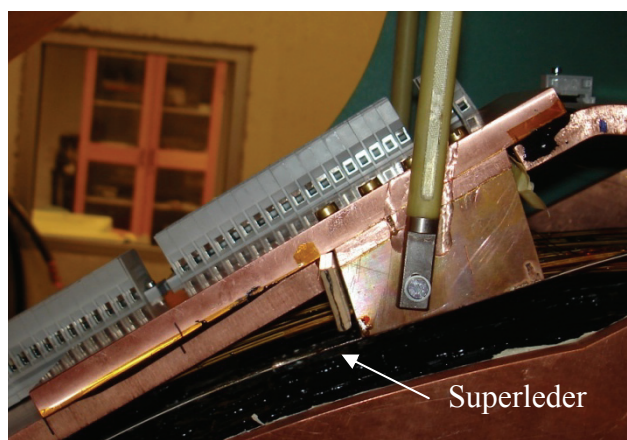
På under siden av del 3 ble det lagt et lag med tinn produsert Multicore og av samme type brukt under skjøting av diskene. For å kunne skjøte superlederen med kobberdel 3, ble loddeverktøyet brukt under skjøting av diskene endret. Figur 3-18 viser kobberdelene og loddeverktøyet med modifikasjonene. Endringen medfører at verktøyet fungerte som under skjøtingen, ved at det brukes fjærkraft for å presse loddeflatene mot hverandre under oppvarming.

Under loddingen ble både temperaturen på loddebolten og lederpinnen overvåket. Høyeste temperatur på loddebolten ble målt til 280 grader celsius og høyeste temperatur på lederstaven var 90 grader celsius. Pinnen var separert fra kobberdelen med en liten teflon bit. Dette ble gjort for å holde temperaturen på lederpinnen så lav som mulig.



Figur 3-19 Oppsettet for lodding av kobberdel 3 (venstre) og ferdig loddet superleder og kobberdel (høyre)

Del 3 ble skrudd fast i del 1 og 2 med fire 5 mm skruer. Mellom delene ble det lagt et lag med Apiezon N fett, noe som skulle sikre god termisk kontakt. Figur 3-20 viser kobberdel 1 til 3 montert på skjøtekjøledelen.



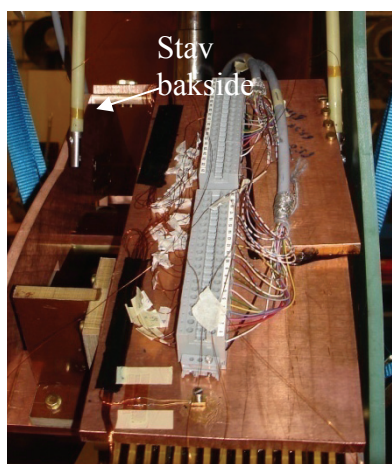
Figur 3-20 Skjøt mellom superleder og pinne på fremsiden

Motstanden i dette stykket kan beregnes ved bruk av formel (1.6).

$$R = \frac{\rho \cdot L}{A} \quad (1.6)$$

P er motstandsparameteren, L er lengden og A er arealet. Motstandsparameteren ved 20K er  $1,92e^{-10} \Omega m$  (16). Lengden fra staven til superlederen er 1,1 cm på det korteste og arealet på kobberdelen er  $6,4cm^2$ . Innsatt i formelen blir motstanden  $3n\Omega$ . Effektutviklingen som følge av denne motstanden vil ved 200A være på  $132\mu W$ .

På baksiden var avstanden mellom lederpinnen og spolen på ca 6,5cm. I tillegg var avstanden til kjøledelen ca 6,0 cm. Kjølingen av overgangen mellom superlederen og lederpinnen ble derfor gjort ved å lage en forbindelse til grenseflate to. Det ble laget to deler for å både få god kjøling og god elektrisk kontakt. Del en lagde forbindelsen mellom lederpinnen og superlederen, mens del to ble skudd fast på undersiden av del en og limt fast til grenseflate to for kjøling. Figur 3-21 viser staven på baksiden før den ble tilkoblet spolen.



Figur 3-21 Øvre del av spolen før sammenkobling av lederstav og spole på baksiden

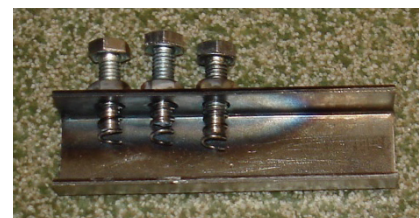
Del to måtte ha god termisk kontakt med grenseflate to og del en. Vedlegg 11 viser målene på del 1 og Vedlegg 12 viser målene på del to. Delene måtte i tillegg være elektrisk isolert fra grenseflate to. Del to ble derfor først påført kaptontape, slik at den skulle være elektrisk isolert fra grenseflaten. Siden som skulle ligge mot grenseflaten og siden som skulle ligge mot del en ble slipt for å gi flatene så god kontakt som mulig. På del 1 ble flaten som skulle ligge mot del to og flaten som skulle skrues fast i lederstaven slipt.



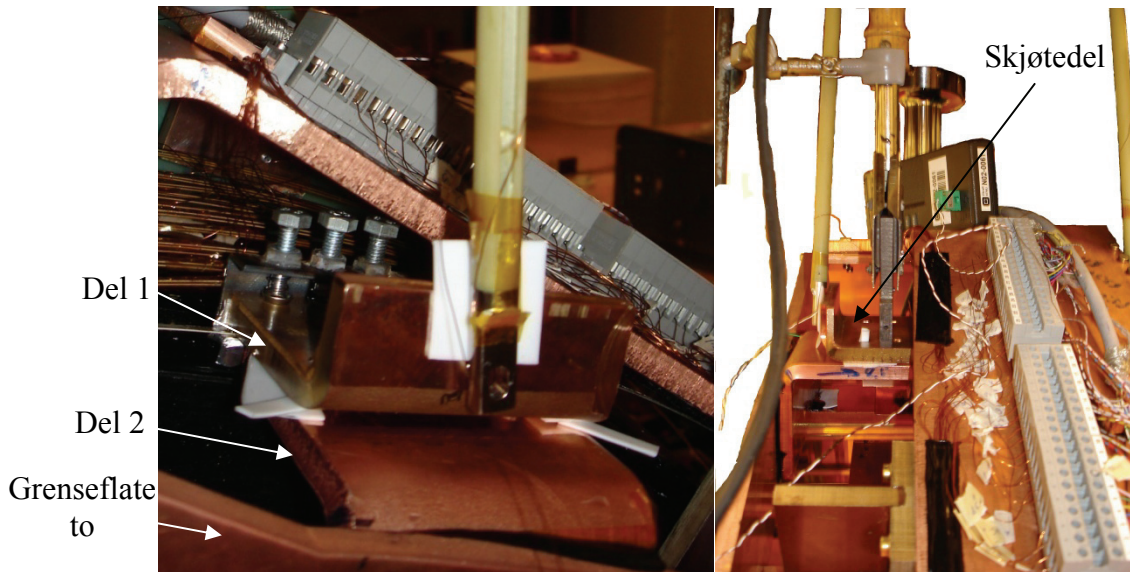
Figur 3-22 Del to med påført et lag kaptontape og epoksy (venstre) og under montering (høyre)

Del 2 ble limt fast til ytterveggen med epoksy. Del en måtte ha både god termisk kontakt med del to og god elektrisk kontakt med superlederen i spolen og lederstaven. Delen ble festet til del to med fire 6mm skruer, og det ble lagt Apiezon N fett mellom dem for å sikre god termisk kontakt. For å feste del en til superlederen ble det lagt et lag tinn, av typen brukt under spleising, på undersiden av delen der ledere skulle ligge. Under spleisingen av diskene ble det lagt et lag tinn på superlederen. Under sammenkoblingen ble delen varmet opp av en loddebolt, og superlederen ble presset sammen med kobberdelen med en fjærmekanisme. Figur 3-23 viser bilde av fjærmekanismen og Vedlegg 13 viser målene.

Fjærmekanismen har bare fjærdrevet trykk på den ene siden, da det var lite plass under skjøtekjøledelen. Under skjøtingen ble delene skilt med en bit teflon for å sikre at varmen fra loddebolten kun gikk til å varme del en. Lederstaven ble også isolert fra del en med en teflonbit. Kontaktflaten mellom loddebolten og kobberdelen var såpass liten at temperaturen på loddebolten oversteg 320 grader celsius før skjøten smeltet sammen. Figur 3-24 viser plasseringen av kobberdelene, fjærmekanismen og loddebolten.



Figur 3-23 Fjærmekanisme for å klemme sammen superlederen og kobberdelen



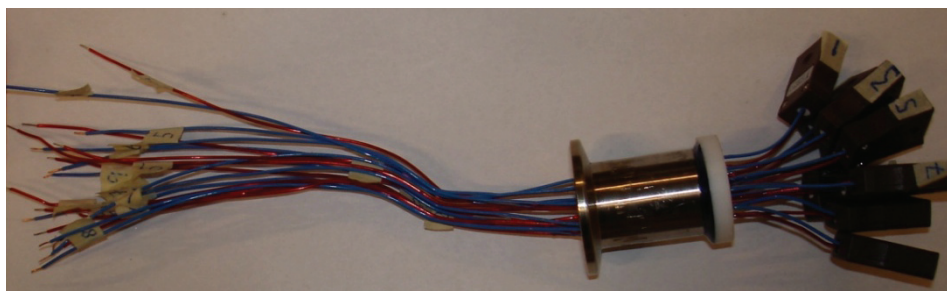
Figur 3-24 Del 1 for skjøting av lederstav og spole på bakside (venstre) og samme del under loddingen (høyre)

Motstanden i denne delen kan beregnes ved bruk av formel (1.6). Lengden mellom hullet på stave og superlederen er ca 8,1cm. Arealet er på 8,5cm<sup>2</sup>, innsatt i formelen gir dette en motstand i kobberdelen på 18nΩ ved 20K. Effektutviklingen i kobberdelen ved 200A blir dermed 0,74μW.

### 3.6 Temperaturføleroppsett

Målesystemet måtte bestå av et vist antall måleelementer, en datalogger for å logge resultatene, en gjennomføringsflens inn til kryostaten, og en form for referansetemperatur. Det ble brukt 100m type T termoelementer med en diameter på 0,2mm, og ca 3m termoelementer med en diameter på 0,5 mm. I tillegg ble det brukt 20 skjøter for termoelementer, en standard 25mm flens for vakuumbutstyr og noe teflon. Type T termoelementer består av en leder av konstantan og en leder av kobber.

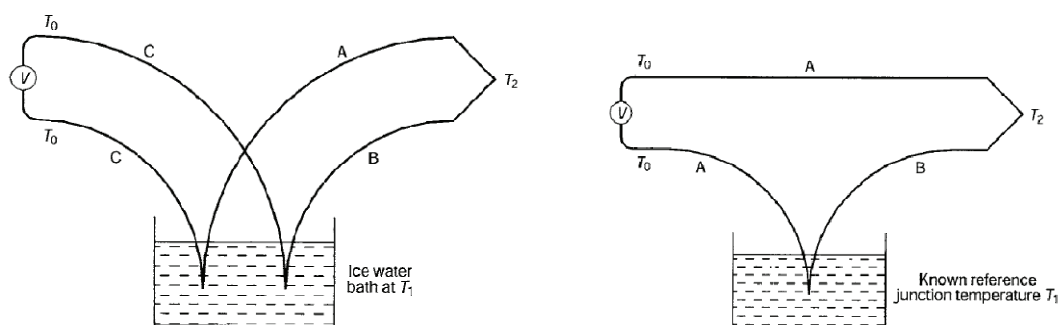
I gjennomføringen ble det brukt termoelementer med en diameter på 0,5mm, mens det ellers i systemet ble brukt termoelementer med en diameter på 0,2mm. Dette gjorde elementene i gjennomføringen stivere og lettere å håndtere. Termoelementene i gjennomføringen ble kuttet i lengder på ca 30 cm, og avisolert på stykket som skulle ligge i gjennomføringen. Avisoleringen ble gjort for å sikre at gjennomføringen ble helt tett. Det ble laget et lokk i teflon som sikret at ikke det ble elektrisk kontakt mellom termoelementene i gjennomføringen. Flensen ble så fylt med Epifix epoksy. For å holde termoelementene på plass under epoksy limingen ble det brukt Araldite lim. Av plassmessige årsaker ble det støpt inn 10 termoelementer i gjennomføringen.



Figur 3-25 Gjennomføring til kryostaten (20mm flens, og lengde på termoelementene var ca 30cm)

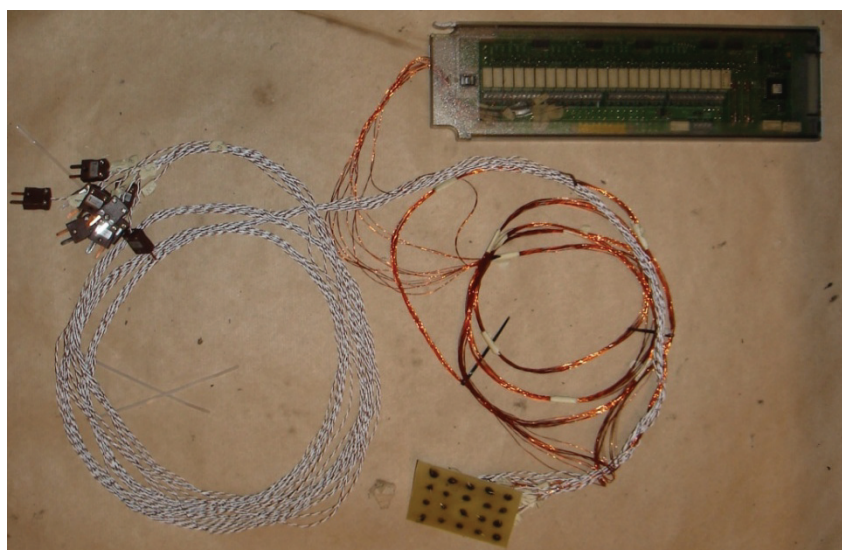
Figur 3-25 viser gjennomføringen med skjøter påmontert på den ene siden. Termoelementene som ble brukt i gjennomføringen var ikke nye, de ble derfor testet før de ble støpt inn i flensen for å sikre at de var hele under isolasjonen. Det ble brukt skjøter med innlagt termoelement for å gjøre designen så brukervennlig som mulig. Disse sammenføringene gjorde at det ikke var behov for lodding ved frakobling av målepunktene på den ene siden, eller apparaturen på den andre siden av gjennomføringen.

Det ble valgt å bruke flytende nitrogen som referansetemperatur. Termoelementene måtte dermed termineres i flytende nitrogen for at spenningen som oppstod skulle bli en funksjon av forskjellen mellom temperaturen på testobjektet og nitrogenet. Årsaken til at flytende nitrogen ble brukt var for at temperaturforskjellen mellom referansen og kryostaten skulle være så liten som mulig, det var i tillegg billig og lett tilgjengelig. Termineringen av referansen kan gjøres på to måter, som vist i Figur 3-26.



Figur 3-26 Terminering av termoelement i referanse temperaturen T1 ved å terminere begge lederne i referansen (venstre) og terminere en av lederne (høyre) (6)

Enten kan det brukes termoelementer i alle lederne og kun ha en av termoelementlederne i referanse (høyre), eller begge lederne i termoelementet kan termineres i referansen. Begge disse løsningene gir samme resultat, ved at spenningen som måles er et resultat av temperaturforskjellen i testobjektet og referansen. Siden avstanden mellom gjennomgangen i kryostaten og termineringspunktet var stor, ble begge elementene terminert i flytende nitrogen. Dette gjorde at lengden på termoelementene kunne begrenses. Lengdene og kostnadene til termoelementene ble dermed redusert. Figur 3-27 viser delen av systemet som skulle ligge på utsiden av kryostaten.



Figur 3-27 Del av temperatur målesystemet som ligger på utsiden av kryostaten

Termoelementene ble sølvloddet til lakkisolerte kobberledere med en diameter på 0,3mm, og limt med epoksy til en plate av glassfiber. Under målinger ble platen senket i flytende nitrogen, og dannet referansepunktet. Epoksyen som ble brukt var Stykast FT2656 med herder Catalyst 24LV fra Emerson & Cuming. Kobberlederne ble tilkoblet et loggekort til bruk i en Agilent datalogger. Selve målepunktene ble også sølvloddet og dyppet i Stykast epoksy for å gjøre dem mest mulig robuste. Den frie enden på delen av termoelementene som skulle ligge inn i kryostaten ble koblet til len skjøt, slik at de kunne kobles rett på gjennomføringen.

På utsiden av kryostaten skulle referansebadet stå på gulvet eller eventuelt på et bord ved siden av kryostaten, lengden på termoelementene og kobberlederne som skulle ligge på utsiden av kryostaten ble begge kuttet i 3m. Den delen av termoelementene som skulle ligge inne i kryostaten ble kuttet i lengder på 5 og 6 m. De lange lengdene sikret at de både kunne festes enkelt, forankres godt på forskjellige steder i kryostaten og være enkle å koble til gjennomføringen.

Den ene lederen i termoelementene er av kobber, og har derfor god varmeledningsevne noe som kan føre til feilmålinger. Forankringen av termoelementene er derfor avgjørende for at ikke varmen skal ledes til målepunktet. Beregning av varmeledning er gjort med metoden gjennomgått i Kap 2.5, og komplett utregning ligger i Vedlegg 5. Den totale effekten som ledes inn gjennom termoelementenes kobberledere er beregnet til 8,5mW.

Det ble gjort to forsøk på å kalibrere termoelementene, gjennomføringen av disse testene og resultatene er gitt i Vedlegg 1. Resultatene ble ikke brukt videre i prosjektet, men temperaturmålesystemet ble utvidet med en kalibrert Lake Shore Cernox 1070-SD-4B temperaturføler. Cernox sensoren var kalibrert for temperaturer mellom 4 og 40K, og sikret at temperaturen på et punkt i kryostaten kunne bestemmes med meget god nøyaktighet. Cernox sensoren har et maksimalt temperaturavvik på 7mK mellom 1,4K til 10K, 16mK ved temperaturer 10K til 20K og 24mK på temperaturer 2K til 40K. (17) For å sjekke usikkerheten på termoelementene, ble både målepunktene og referanseplaten senket i flytende nitrogen.

Siden det ikke var noen temperaturforskjell mellom målepunktet og referansen skulle det ikke være noe utgangssignal fra elementene under usikkerhetstesting. Elementet med det største avviket fra 0 V, lå på  $-7,19\mu\text{V}$ . Dette tilsvarer 0,44K ved en temperatur på flytende nitrogen på 77K. Bakgrunnen for disse tallene er utregninger gjort ved hjelp av tabellen i Vedlegg 2  $7,19\mu$  tilsvarer 1,14K ved 23k.

### **3.6.1 Plassering av temperaturfølere**

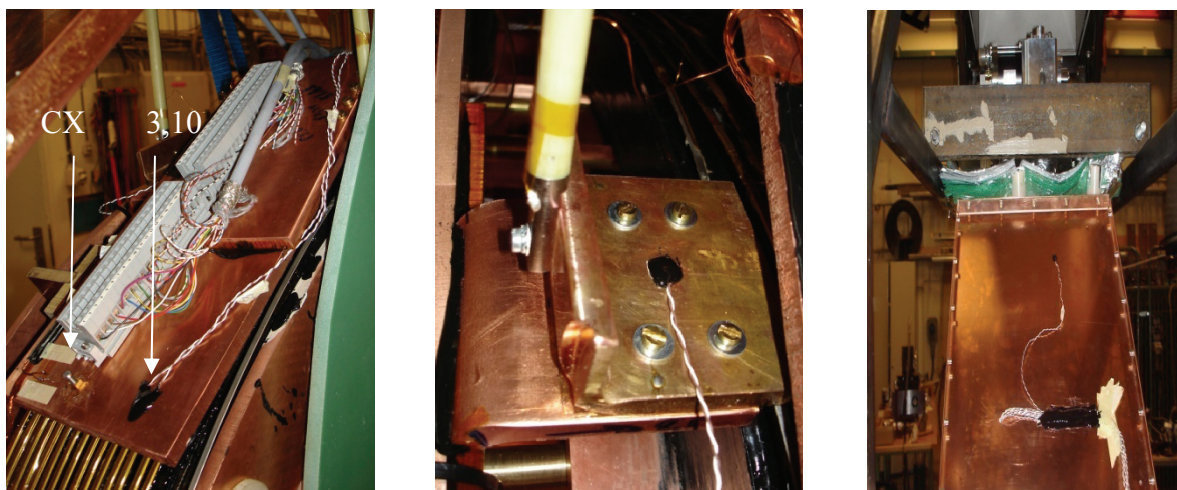
Ti termoelementer ble støpt inn i gjennomføringen. Dette satte sine begrensinger til plassering av dem. Viktige plasseringer for temperaturmålinger var delen som skulle kjøle skjøtene, kobberdelene som forbandt spolen med lederpinnene, hver side på spolen, bunnen på spolen, en nærme kaldhode øverst i kryostaten og en i det ytre kammeret. Hvis delen som skulle kjøle skjøtene eller kobberdelene mellom spolen og lederstaven hadde en temperatur som oversteg kritisk temperatur på superlederen, ville spolen ikke være superledende i dette området.

Termoelementene ble kjølt ved en tostegs forankring, først ble de termisk forankret i den ytre skjermen, så ble de forankret i grenseflaten på baksiden av spolen. Forankringen ble gjort ved å lime termoelementene til kobberdelene med Stykast epoksy. Målepunktet ble også limt med Stykast epoksy.



Termoelementene ble ført gjennom kobberskillet mellom ytre og indre kammer med et hull på 5mm. Cernox sensoren ble plassert ytterst på skjøtekjøledelen sammen med to termoelementer. Vedlegg 14 viser Autocad tegning over plasseringen til termoelementene merket 1-10. I vedlegget er enkle termoelementer merket med tom sirkel, doble termoelementer er merket med en fylt sirkel, punktet med Cernox sensorer og to termoelementer er merket med en femkant og plasseringen av termisk forankringer er markert med en trekant.

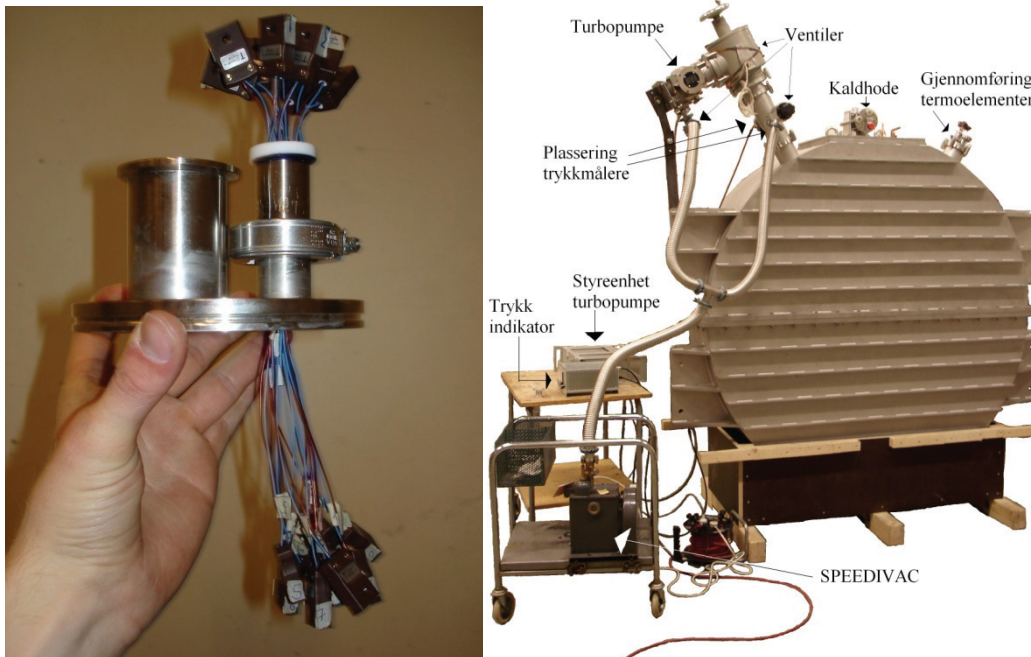
Termoelement nr 6 og 7 på bunnen av spolen ble lagt slik at det kunne skilles mellom temperaturen på innerste tønn og de lengre ute. Element 6 lå på innsiden av spolen, mens nr 7 ble lagt lengre ut mot ytterste tønn. Termoelementene på sidene (4 og 5) ble limt på midten av den siste disken som ble limt på. For å holde termoelementene inntil spolen på stedene hvor de ikke var limt fast ble det brukt strips. Figur 3-28 viser plassering av termoelement 1,3,8, 10, Cernox sensoren og varmesluk i ytre kammer.



Figur 3-28 Plassering av termoelement 3,10 og Cernox sensoren (venstre), plassering av termoelement nr 8 på kobberdel mellom lederstav og spole på bakside (midten) og plassering av termoelement nr 1 og varmesluk i ytre kammer (høyre)

### 3.7 Gjennomføringer og vakuumutstyr

På kryostaten var det to hull for tilkobling av vakuumutstyr og eventuelt annet utstyr. Begge hullene hadde en diameter på 100mm. Gjennomføringen med termoelementene hadde en diameter på 20mm, det ble derfor laget en overgang fra 100mm til 20mm. Dette ble gjort ved å tilpasse et lokk på 100mm. På lokket ble det sveiset på en flens med en diameter på 20mm, slik at termoelementene kunne kobles direkte på med en o – ring og en klemme. Det ble også satt inn en gjennomføring for tilkobling av 40mm utstyr, men denne ble ikke tatt i bruk. Figur 3-29 viser gjennomføringen.

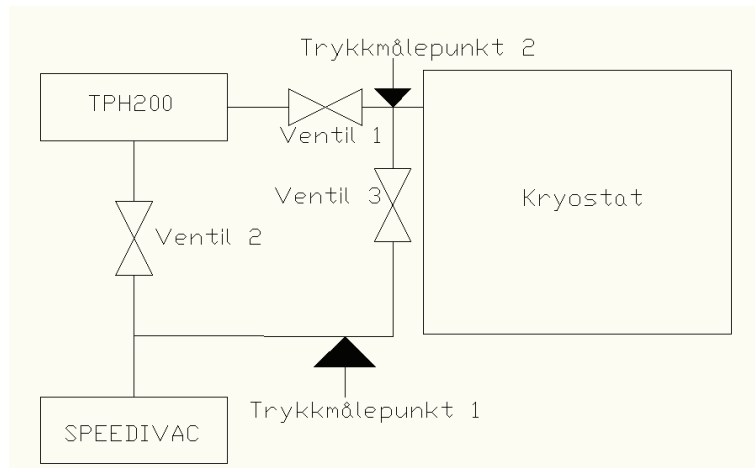


Figur 3-29 Gjennomføring a termoelementene (høyre) og hele systemet (venstre)

Før gjennomføringen ble montert ble den vasket med isopropanol og Acetone, for å hindre at fett og partikler kom inn i kryostaten. Flensen for 40mm utstyr ble lukket med et lokk. Vedlegg 15 viser tegning av lokket med mål. Skjøtene på termoelementene ble koblet til på hhv. innsiden og utsiden av kryostaten.

Vakuumsystemet bestod av to pumper, to manometer, tre ventiler, slanger og flenser. Pumpene ble plassert slik at de kunne settes i parallell eller i serie alt etter hvilke ventiler som ble åpnet. Den første pumpen var av typen Spedeevac produsert av Edwards High Vacuum Limited, den andre var en turbomolekylær pumpe av typen TPH200 produsert av Pfeiffer. Prosedyren for vakuumpumpingen var først å pumpe med SPEEDIVAC til trykket nådde ca  $10^{-2}$ mbar, før TPH200 pumpen ble koblet inn i serie. TPH200 ville da ligge nærmest kryostaten. Systemet er vist i til venstre på Figur 3-29.

Under pumpingen med kun SPEEDIVAC var ventil 2 og 3 på Figur 3-30 åpne, trykkmålepunkt 1 ble da brukt til å måle trykket. Manometeret på målepunkt 1 hadde en målefeil og viste for høye verdier, den ble derfor bare brukt som en indikasjon på trykket. Ved innkobling av TPH200 lukkes ventil 3 og ventil 1 åpnes. Manometeret på målepunkt 2 ble brukt etter ventil 1 ble åpnet. Måleområdet var forskjellige på manometerne, noe som hindret bruk av manometer 2 ved kun SPEEDIVAC inne. Skalaen til manometer 2 begynte på  $10^{-3}$ mbar og gikk ned til  $10^{-7}$ mbar, mens manometer 1 gikk ned til  $10^{-3}$ mbar.



Figur 3-30 Vakuumsystemet

### 3.8 Kjølesystemet

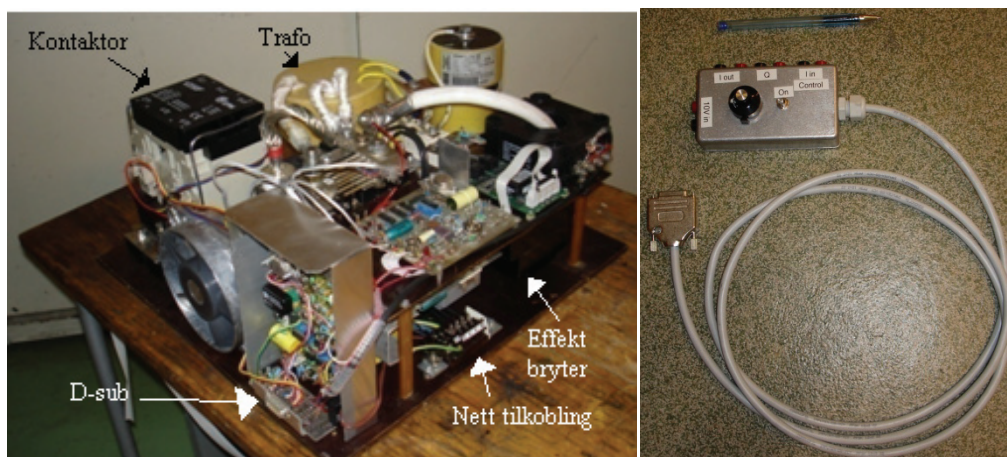
Spolen ble kjølt med et Kaldhode montert i toppen av kryostatet. Kaldhode var produsert av Sumitomo Heavy Industries og av modell RDK-408S. Kompressoren som ble brukt var produsert av Sumitomo Heavy Industries modell CSW-71D. Kaldhodet er av typen tostegs GM cycle cryo-refrigirator. Kjølekapasiteten er på 30W ved 45K for det første steget og 5,4W ved 10K for det andre steget. Heliumtrykket under kjøling skal ligge mellom 2,00MPa og 2,20MPa. (18)

### 3.9 Strømforsyningen

Spolen skulle ha tilnærmet null i motstand, det ble derfor spesialkonstruert en strømforsyning til formålet. Den ble satt sammen og konstruert av Zdenek Jelinek. Strømforsyningen ble tilkoblet nettet med en 3fase 400V tilkobling, og det ble laget en liten styreenhet for forsyningen. Styreenheten ble tilkoblet strømforsyningens d-sub kontakt. Forsyningen ble laget slik at hvis den resistive spenningen over spolen overgikk et kritisk nivå, ville den kutte strømmen og strømmen ville bli ledet gjennom en motstand. All den induktivt lagrede energien ville da bli opptatt av motstanden. Spoleparet for induksjonsovnen er beregnet til en induktans på 18H. Ved en strøm på 200A, vil den totale energimengden som er lagret i spolen være på 360KJ. Formelen for lagret energi i en spole er gitt i formel (1.7).

$$U = \frac{1}{2} L \cdot I^2 \quad (1.7)$$

Figur 3-31 viser strømkilden.



Figur 3-31 Strømforsyningen til spolen (venstre) og styringsenheten (høyre)

Strømforsyningen trenger to innsignaler for å kjøre I og S. S signalet ble koblet til en bryter og skulle kun brukes for å skru forsyningen av og på. I signalet ble koblet på et potmeter og styrte høyeste strøm forsyningen skulle gi ut på terminalene. I signalet gikk fra 0 til 10V, hvor 10V tilsvarte 300A på terminalene. (19) I tillegg til inngangen var det 3 utganger I, Q og S. I ut viser strømmen som til enhver tid forsyner spolen. Signalet gikk fra 0-10V hvor 10V tilsvarte 300A. Q ut angir volt over det resistive delen på spolen. Signalet går fra 0-10V og tilsvarer 0-10V resistivt spenningsfall.

S ut ga signal når forsyningen fungerte som den skulle. Den ble satt til en utgang på styreenheten, slik at det kunne kobles til et multimeter for motstandsmåling. Null motstand tilsvarte S ut på, mens brudd i kretsen gir S av. På styreenheten ble det også lagt inn en egen utgang for å måle den virkelige spenningsverdien potmeteret ga til I inn.

Under kjøring skulle potmeteret først settes til en verdi etter valgt strøm. Så ble bryteren til S inn satt på og strømmen til spolen ville dermed rampes opp med en hastighet på 0,9A/s. (20)

Hvis spenningen I inn ble endret under drift, ville forsyningen enten øke strømmen med 0,9A/s eller senke den med 0,05A/s. (20) Verdiene var avhengige av induktansen til spolen. Hvis startsignalet S settes til av under drift, vil strømmen kuttes fra spolen og kjøres gjennom motstanden. For full oversikt over pinnene til kontrollenheten se Vedlegg 17, der vises også koblingskjemaet for spolen, motstanden og strømkilden. På koblingskjemaet er det en effektbryter som ikke er tegnet inn, denne beskytter kretsene i strømforsyningen mot indre feil. Hvis strømforsyningen blir forsøkt kjørt med bryteren ute, vil spenningene Q ut og I ut gi ulogiske signaler.

## 4 Forsøksbeskrivelse

Det skiller mellom forsøk gjort før og etter nedkjøling av kryostaten. For temperaturmålinger og spenningsmålinger i forsøkene ble systemene gjennomgått i kapittel 3 brukt. I Nedkjølt tilstand er oppsettet i Vedlegg 18 brukt og utstyrslisten gitt i Vedlegg 17 inneholder alt utstyret som ble brukt under forsøkene.

### 4.1 Skjøtemotstand i romtemperatur

Før kryostaten ble satt sammen ble det undersøkt hvor stor motstanden over skjøtene i spolen var ved romtemperatur. Dette ville avdekke skjøter som stakk seg ut i positiv eller negativ retning. Eventuelle avvik kunne da bli undersøkt nærmere og om mulig rettet. Motstanden over skjøten i normalledende tilstand vil i stor grad være gitt motstand av resistansen i kobberlaget i superlederen. Resultatene har derfor ingen betydning i nedkjølt tilstand. I tillegg til resultatene fra testen, ville forsøket gi en økt kompetanse i bruk av utstyret.

Gjennomføringen av forsøket ble gjort ved å føre en strøm gjennom spolen og måle spenningen over skjøtene med spenningsmålingssystemet. Strømforsyningen som ble brukt kunne gi ut 10A. Resultatene fra dette forsøket er gitt i kapittel 5.1.

### 4.2 Temperaturprofil under nedkjølingen

Under nedkjølingen av kryostaten ble spenningen fra termoelementene logget. Resultatene fra nedkjølingen ville gi en oversikt over temperaturfordelingen i kryostaten med hensyn på tiden. Et tilsvarende forsøk ble utført før spolen ble satt inn av personene som bygde kryostaten. Resultatene fra deres forsøk er gitt i Vedlegg 24. Usikkerheten til målingene er diskutert i kapittel 3.6. Resultatene fra forsøket er gitt i kapittel 5.2.

### 4.3 Induktansmåling

Beregning av L ble gjort ved å sende en vekselstrøm gjennom spolen og måle spenningen som oppstod over spolen. AC strømmen ble generert av en signalgenerator. Under testen ble de resistive tapene antatt null. Denne antagelsen ble gjort siden reaktansen til spolen var såpass mye høyere enn de resistive motstandene i skjøtene og lederne på utsiden. Spenningen som oppstår vil dermed kun være avhengig av induktansen til spolen. Dette kan utledes fra ohms lov (se formel (1.8))

$$U = Z \cdot I \rightarrow \frac{U}{I} = R + j\omega L \xrightarrow{R \rightarrow 0} L = \frac{U}{I \cdot j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} \quad (1.8)$$

Ved å styre strømmen og frekvensen i kretsen samt å måle spenningsoppbygningen kan induktansen beregnes. Den totalt beregnede induktansen på hele induksjonsovnene var 18H.

(1) Resultatene fra forsøket er gitt i kapittel 5.3.

### 4.4 Motstandsmålinger i nedkjølt tilstand

Etter nedkjølingen ble motstanden over skjøtene og de individuelle diskene sjekket ved en lav strøm. Under denne testen ble ikke strømforsyningen fra kap. 3.9 brukt, men en standard strømforsyning som kunne levere 10A. Dette ble gjort for å sjekke at det ikke var noen defekter i spolen og at skjøtene var i orden. Motstanden i skjøtene vil også angi hvor mye

effekt som utvikles i hver skjøt ved en høyere strøm. Hvis det ikke hadde vært noen skjøter eller noe materiale som var normalledende, skulle det ikke blitt noe spenningsoppbygning over spole i stasjonær tilstand. En liten endring i strømmen vil imidlertid skape en induktiv spenningsoppbygning etter formelen for potensial på terminalene til en ideel spole gitt i formel (1.3).

Det var derfor viktig at strømmen fikk stabilisere seg før målingen ble tatt, slik at ikke det induktive bidraget til spenningen ble inkludert i resultatene. Oppsettet for denne testen er gitt i Vedlegg 18. Resultatene fra forsøket er gitt i kapitel 5.4.

#### **4.5 Test av strømkilde på alternativ krets**

For å sjekke den spesialkonstruerte strømkilden, ble den først testet på en alternativ krets. Formålet var å sjekke at strømkilden løste ut ved en resistiv spenningsoppbygning. Strømkilden ble produsert i Tsjekkia og kan derfor ha fått skader i transport eller lignende, som bare vises ved en test. Testene ble utført ved to forskjellige fremgangsmetoder. Under begge testene ble en variabel motstand seriekoblet med en spole. Metode en var å sette en fast strøm fra strømkilden og øke motstanden til den resistive spenningsoppbygningen ble så høy at strømkilden koblet ut og kjørte strømmen gjennom motstanden. Under den andre testen ble motstanden holdt på et nivå, mens strømmen ble økt til kontaktoeren slo inn og strømmen ble ledet gjennom motstanden. Spolen som ble brukt hadde en induktans på 2,2mH, og en motstand på 24m $\Omega$ . Induktansen på hele induksjonsovnen var estimert til å ha en induktans på 18H. Den variable motstanden kunne endres fra ca0 $\Omega$  til ca 1,5 $\Omega$ . Resultatene fra forsøket er gitt i kapitel 5.5.

#### **4.6 Test av strømkilde på superledende spole**

Det ble utført en test med strømkilden tilkoblet den superledende spolen. Denne testen ble utført for å se hvordan strømkilden reagerte på spolen med svært høy induktans og nesten ingen resistans. Under forsøket ble det brukt en transfohunt til å måle strømmen. Denne gir ut en spenning som angir strømmen etter et forvalgt forhold. Testen ble i prinsippet utført som i Vedlegg 18, men strømkilden ble koblet som vist i Vedlegg 17.2. Resultatene er gitt i kapitel 5.6.

#### **4.7 Feltmåling**

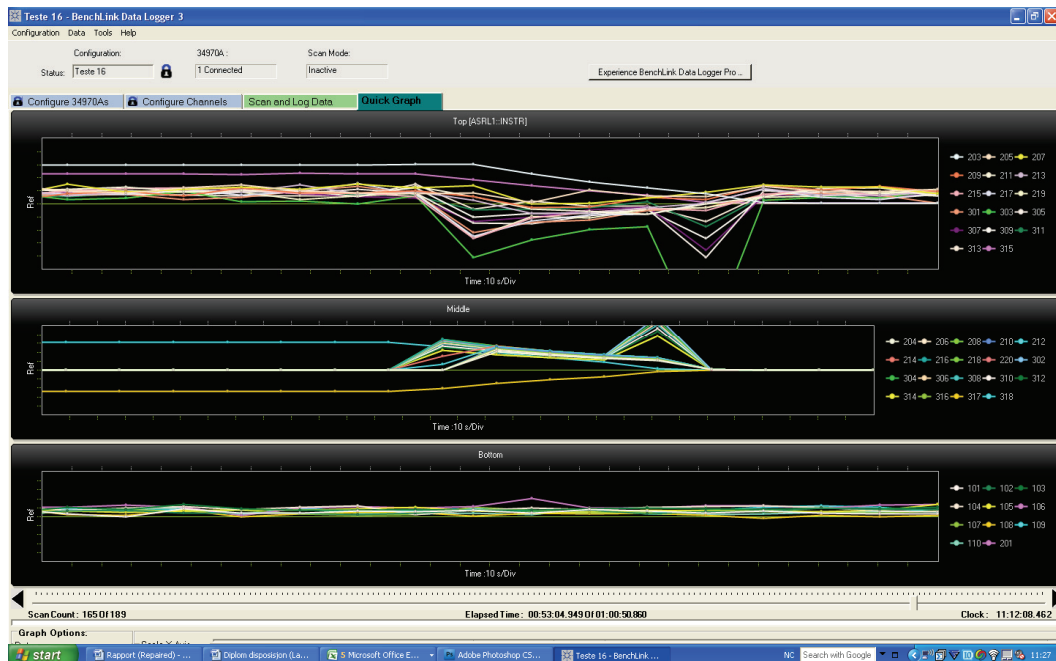
Feltet spolen satte opp ble målt ved å bruke et Gaussmeter ved avstander på 1m, 1,5m og 2m fra kryostatveggen. Feltet ble målt både aksielt (Z) og radielt (R) fra spolen. Det ble ført strømmer på 5,34A, 8,3A og 9,42A gjennom spolen under målingene. Niklas Magnusson gjorde en FEM analyse av feltet til spolen. Resultatene av FEM analysen ligger i Vedlegg 20. Resultatene fra målingene er gitt i kapitel 5.7. Feltet B er lineært avhengig av strømmen i spolen. (14)

#### **4.8 Temperaturmålinger under oppvarming**

Etter at testene var gjort, ble kompressoren og kaldhode skrudd av. Dette gav mulighet for flere temperaturmålinger. Sjekk av motstanden over Cernox sensoren under oppvarmingen og temperaturprofil for termoelementene under oppvarming. For plotting av resultatene ble Matlab koden i Vedlegg 22 brukt. Resultatene er gitt i kapitel 5.8.

## 4.9 Registrering av resultater

Formålet med dette kapittelet er å gi en innføring i hvordan resultatene ble registrert, og hvordan det ble holdt oversikt over alle spenningsmålingene under testene. Under testingen ble det logget 36 spenninger på spolen foruten termoelementene. Alle målingene ble logget med programmet Datalogger 3. Programmet har en mulighet for kontinuerlig plotting av målingene. For å få full oversikt over spenningene og temperatuene i spolen, ble det brukt tre grafer under plotting. Figur 4-1 viser et skjermbilde tatt under testingen av spolen i nedkjølt tilstand. Grafene viser spenningene som ble registrert ved en strømendring fra 2,52A til 0A.



Figur 4-1 Skjermbilde fra Datalogger 3, plottet viser en endring av strømmen fra 2,52A til 0A.

Det øverste plottet viser alle spenningene over skjøtene. Den hvite grafen som ligger øverst er spenningen over skjøten mellom spolen og lederstaven på fremsiden, mens den fiolette som ligger rett under viser spenningen over skjøten mellom spolen og lederstaven på baksiden. På grafen i midten er spenningene over de enkelte spole diskene plottet. På plottet i midten er den blå grafen øverst spenningen mellom lederstaven og klemmene på fremsiden. Den gule grafen på plottet i midten er spenningen mellom lederstaven og klemmene på bakside. Det nederste plottet viser spenningene fra termoelementene. Strømmen ble registrert manuelt med et håndholdt multimeter.

Under testen ble stegene på y akse satt til 100uV for diskene, 1uV for skjøtene og 1uV for termoelementene. På Figur 4-1 er imidlertid stegene for diskene satt høyere, slik at hele det induktive spenningsbidraget vises.

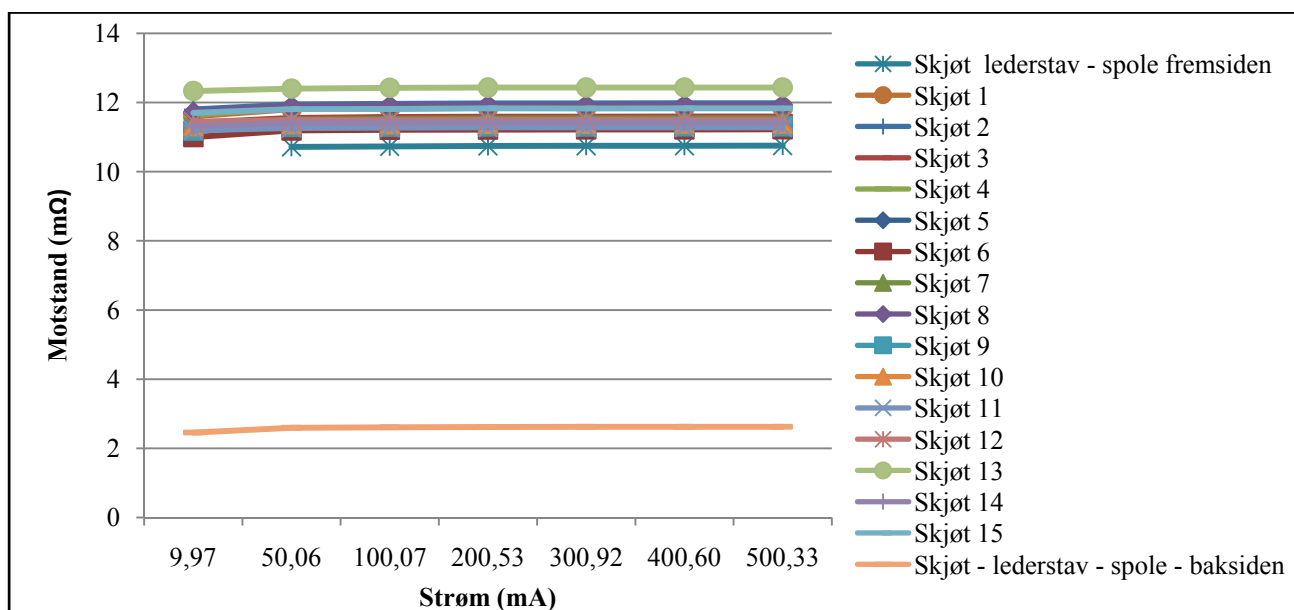
Strømmen som ble sendt gjennom Cernox sensoren ble registrert i programmen KI-TOOL, og logget med klokkeslett. Dette muliggjorde sammenligning ved resultatene fra loggingen gjort i Datalogger 3. For å gjøre det mulig å finne temperaturen under målingene ble det laget et Matlab program vist i Vedlegg 19, der må imidlertid motstanden skrives manuelt inn.

## 5 Resultater

I påfølgende kapittel følger resultatene fra forsøkene beskrevet i kapittel 4. En komplett utstyrliste for alle instrumentene brukt under forsøkene ligger i Vedlegg 16.

### 5.1 Skjøtemotstand i romtemperatur

Før spolen ble kjølt ned ble det gjort en test for å finne motstanden over skjøtene. Dette ble gjort ved å kjøre strøm gjennom spolen og måle spenningen over skjøtene. Formålet med forsøkene var å finne ut som det var noen skjøter som pekte seg ut med høy eller lav motstand, og å bli kjent med måleutstyret. I det første forsøket ble det brukt en DC strøm som ble økt i steg fra 10mA til 500mA, resultatene fra testen er gitt i Figur 5-1.



Figur 5-1 Motstanden over skjøtene ved romtemperatur

Fra figuren ser man at skjøten mellom lederstaven og spolen på baksiden skiller seg ut. Denne skiller seg klart fra skjøten mellom lederstaven og spolen på fremsiden. Fremside skjøten hadde en motstand på ca 10,7mΩ, mens skjøten på baksiden lå på ca 2,6mΩ. I forkant av testen hadde grenseflaten mellom lederstaven og kobberdelen mellom staven og spolen blitt gjort ru ved å pusse med sandpapir. Forskjellen mellom høyeste og laveste verdi målt på spoleskjøtene var 1,43mΩ, noe som tilsvarer en forskjell på ca 11,5 %.

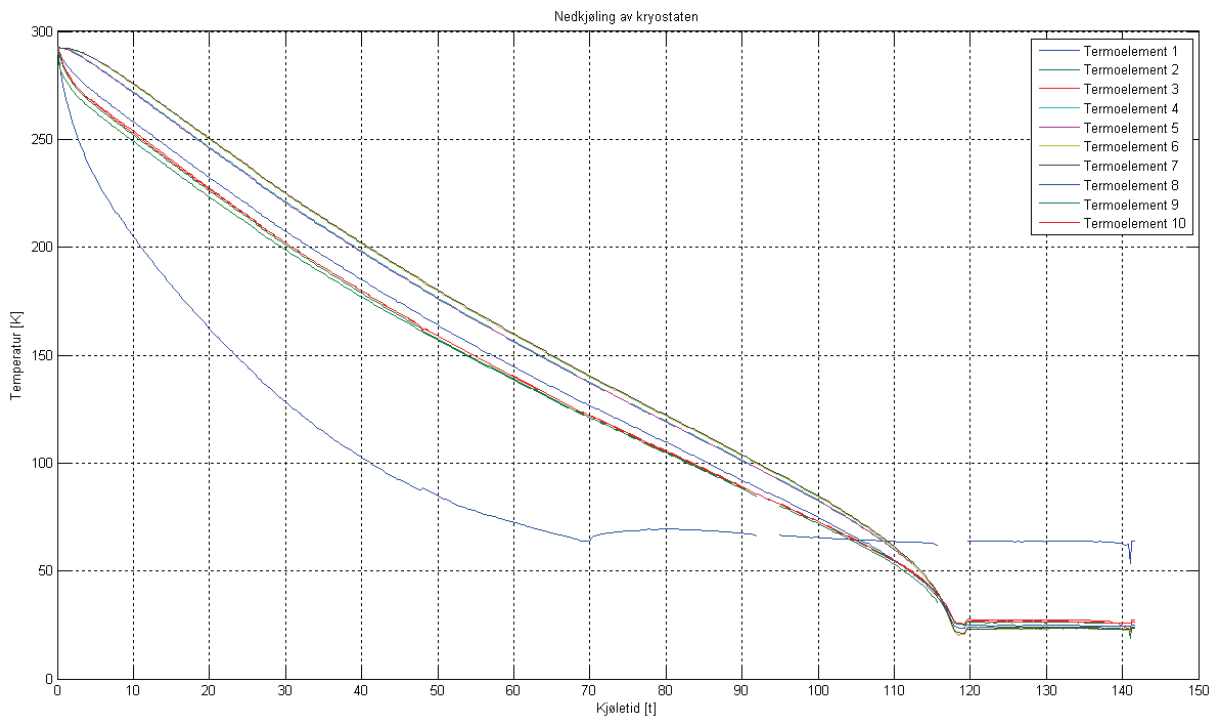
Årsaken til forskjellen mellom skjøten på spolen og lederstavene antas å komme av forskjellig plassering av målepunktene. Avstanden fra målepunktet på spolen og kobberdelen på baksiden var 10 cm, mens den på fremsiden var ca 36 cm. Superlederen i en disk er 550m lang, og motstanden i en dobbel disk ble målt til ca 17ohm. Dette gir en motstand på 30,9mΩ per meter. Forskjellen mellom målepunktene var 26 cm, noe som gir en motstandsforskjell i spolen på 8mΩ. Forskjellen mellom målte verdier var på 8,1mΩ.

Årsaken til forskjellen på de andre skjøtene antas å være forskjellig avstand mellom målepunktene. Utslaget vil utgjøre 300μΩ per cm med en total motstand på 17Ω.



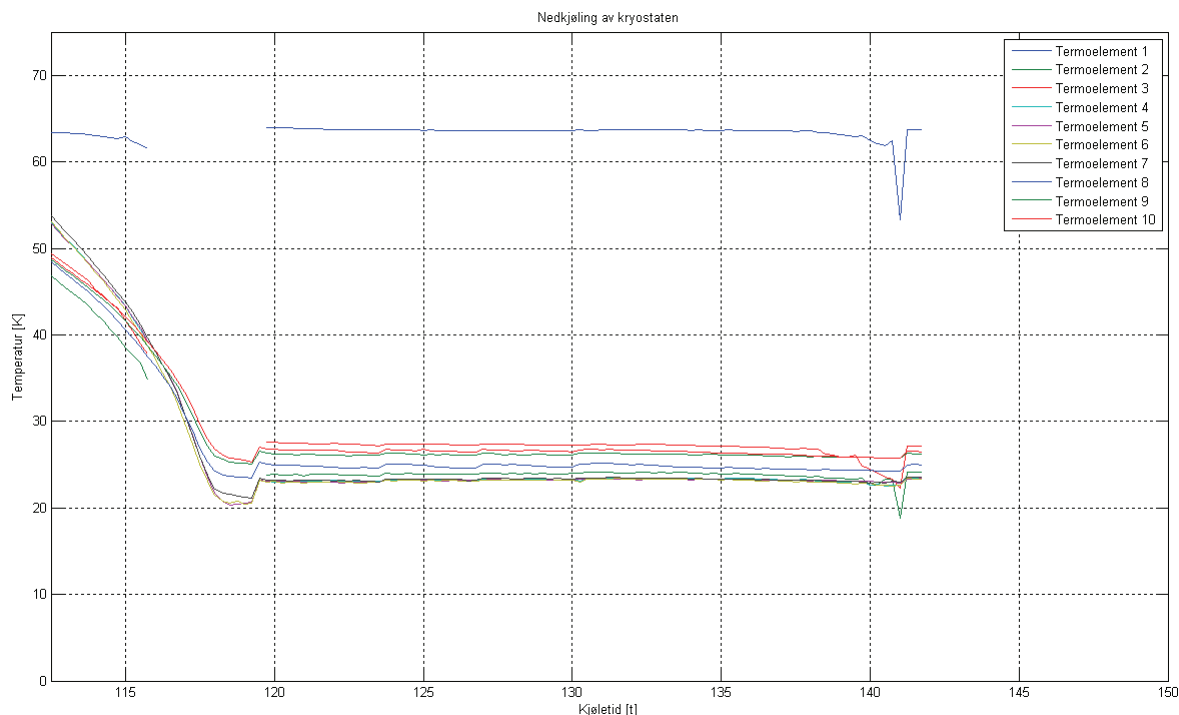
## 5.2 Temperaturprofil under nedkjølingen

Alle ti termoelementene ble logget hvert 15 min under nedkjølingen av kryostaten. Kryostaten brukte ca 120 timer på å nå en stabil lav temperatur. Figur 5-2 viser temperaturen som en funksjon av kjøletiden. Vedlegg 22 viser samme grafen i større format. På plottet er det noen områder hvor enkelte av grafene ikke er kontinuerlige, dette var tidspunkter da nitrogen nivået i referansebadet ble for lavt. Dippen i temperatur etter ca 118 timer kan også tilskrives et lavt nivå i nitrogenbadet.



Figur 5-2 Temperaturfordelingen under nedkjøling av kryostaten

Termoelement nummer 1 skiller seg ut fra resten av termoelementene ved at det kom raskere ned i temperatur, men ble liggende på en vesentlig høyere temperatur enn resten av termoelementene. Den stabiliserte seg på ca 63K. Måler nummer 1 står i det ytre kammeret festet på kobberskjermen. Skjermen er tynn og har dermed liten masse. Plasseringen var i tillegg nærme toppen av kryostaten, noe som gir den liten avstand til kaldhodet. Dette medfører at temperaturen på dette punktet faller fort, men vil ikke komme like langt ned som komponenter inne i det indre rommet i kryostaten.



Figur 5-3 Temperaturfordelingen under siste del av nedkjølingen

Termoelementene som under nedkjølingen ble liggende i midten er henholdsvis 2,3,8,9 og 10. Disse var festet til kobberdeler på skjøtene mellom spolen og superlederen (8 og 9) og på kjøledelen som kjøler skjøtene (2,3 og 10). Termoelementene som hadde den høyeste temperaturen under nedkjølingen var elementene som lå på spolen, disse ble imidlertid de som viste den laveste temperaturen etter at den hadde stabilisert seg. Temperaturen på elementet nærmest kaldhodet viste en temperatur på 24,4K og elementet nærmest Cernox sensoren viste henholdsvis 26,9K og 26,1K.

Elementene nærmest Cernox sensoren hadde en spenningsforskjell på 6uV, noe som ligger 1,19uV under den største forskjellen målt under testing av termoelementene i nitrogenbadet. Termoelementene på selve spolen viste alle 23,7K. Elementene på mellomstykkene mellom spolen og lederstavene var på henholdsvis 24,9K og 26,1K. Der termoelementet på baksiden viste den laveste temperaturen. Skjøten mellom spolen og lederstaven på baksiden er forankret i grenseflaten på baksiden, mens på fremsiden er mellomstykket forankret i kjøledelen til skjøtene. Siden både termoelementene på selve spolen og termoelementet som har en forbindelse til kobbergrenseflaten på baksiden har de laveste temperaturene, kan det tyde på at temperaturen på kjøleplaten er høyere enn temperaturen på kobberdelene som holder spolen sammen.

Forskjellene i temperatur antyder dette, men det må sees i lys av usikkerheten funnet under testingen i flytende nitrogen. Forklaringen på den mulige temperaturforskjellen kan imidlertid være varmeledningen til kobberlederne som måler spenningsfallene over spolen. Denne effekten ble beregnet til 850mW, mens kjøleeffekten på kaldhodet ved 10K er 5,4W. (18)

Cernox elementet viste en vesentlig lavere temperatur enn termoelementene. Etter at temperaturen hadde stabilisert var den høyeste temperaturen som ble målt på Cernox sensoren 7,41K, mens den ble stabilisert på ca 6,5K. For å finne temperaturen på Cernox elementet må

det regnes ut en motstand for hver strømretning, så brukes gjennomsnittet. Spenninger og strømmer som ble målt under gitt temperatur er gitt i Tabell 5-1.

**Tabell 5-1 Målinger gjort for temperaturberegning**

Strømretning	Spenning [mV]	Strøm [uA]	Motstand	Temperatur
+	1,975	0,63	3134	7,41K
-	-2,017	-0,50	4034	

Oppløsningen på Strømmålingen med Keithley multimeteret er 10nA, mens Agilent dataloggeren har en oppløsning som går ned til 100nV. Det ble derfor ikke tatt med flere siffer enn det som er oppgitt i tabellen.

Spriket mellom temperaturene funnet med termoelementer og Cernox sensoren kan skyldes flere årsaker, som varmeledning inn til termoelementene på grunn av dårlig termisk forankring, dårlig nøyaktighet på termoelementene eller feil ved Cernox sensoren. Det ble valgt å stole på Cernox sensoren og bruke termoelementene som en indikasjon på temperaturfordelingen i kryostaten. Alle temperaturene lå under  $T_c$  for superlederen, noe som medfører at superlederen var superledende. Hvis temperaturene var slik termoelementene indikerte, ville imidlertid marginene med hensyn på strømtetthet være lavere.

Før kryostaten ankom NTNU ble den kjølt ned og testet. Temperaturprofilen for nedkjøling før spolen ble montert ligger i Vedlegg 24. Den laveste temperaturen som ble målt var 6,467K og denne målingen ble gjort øverst på en av grenseflatene som holder spolen sammen. Temperaturen målt på kobberskjermens øverste parti var på 37,71K, noe som gir et avvik på 25,69K fra temperaturene målt med termoelementer. Dette kan gi en indikasjon på at termoelementene gav for høye verdier.

Hvis man skulle justert termoelementene etter Cernox sensoren og termoelementene ved Cernox sensoren, ville temperaturen vist under 6K på termoelementene på spolen. Så lav temperatur har ikke vært registrert på kryostaten, verken under tester gjort før eller under prosjektperioden.

### 5.3 Induktansmåling

Testen ble utført ved to forskjellige strømstyrker. Resultatene fra testene er sammenfattet i Tabell 5-2. Beregning av induktansen er gjort med formel(1.8).

**Tabell 5-2 Resultater fra test av induktans**

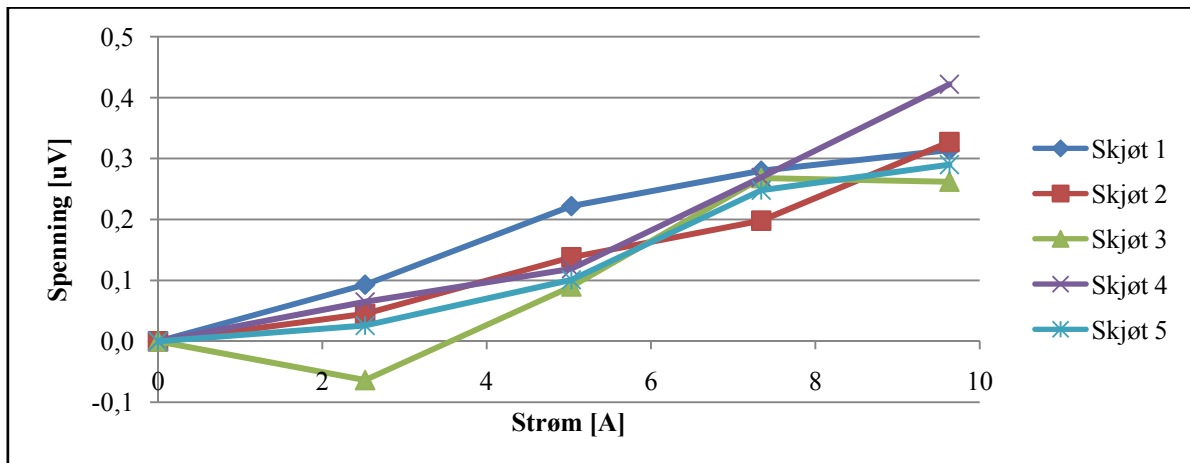
Forsøk nr.	Spenning	Strøm	Frekvens	Induktans (beregnet)
1	1,636V	1,06mA	50,3Hz	4,88H
2	3,000V	1,90mA	51,0Hz	4,93H

Den gjennomsnittelige induktansen på spolen er 4,905H. Induktansen for hele systemet var beregnet til 18H. Resultatene fra målingene viser at induktansen ligger godt under halvparten av induktansen for hele systemet. For spoler kvadreres induktansen ved en dobling av antallet viklinger. Avstanden til spolene på den ferdige induksjonsovn vil imidlertid gi en lavere induktans enn om antall vindinger hadde blitt doblet på en enkelt spole.

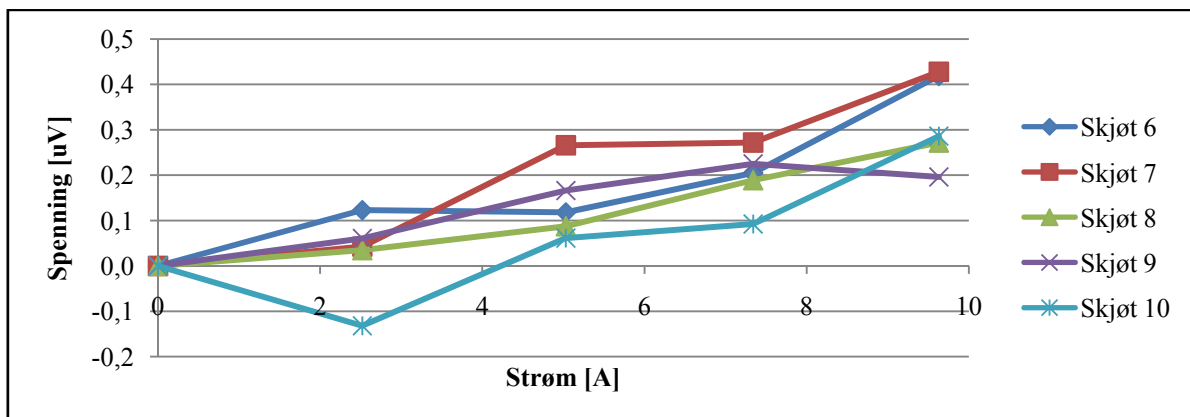
Ved en strøm på 200A blir den smalede energimengden i denne spolen 98,1KJ. Hvis strømmen blir begrenset til 10A, blir energimengden 245J.

## 5.4 Motstandsmåling i nedkjølt tilstand

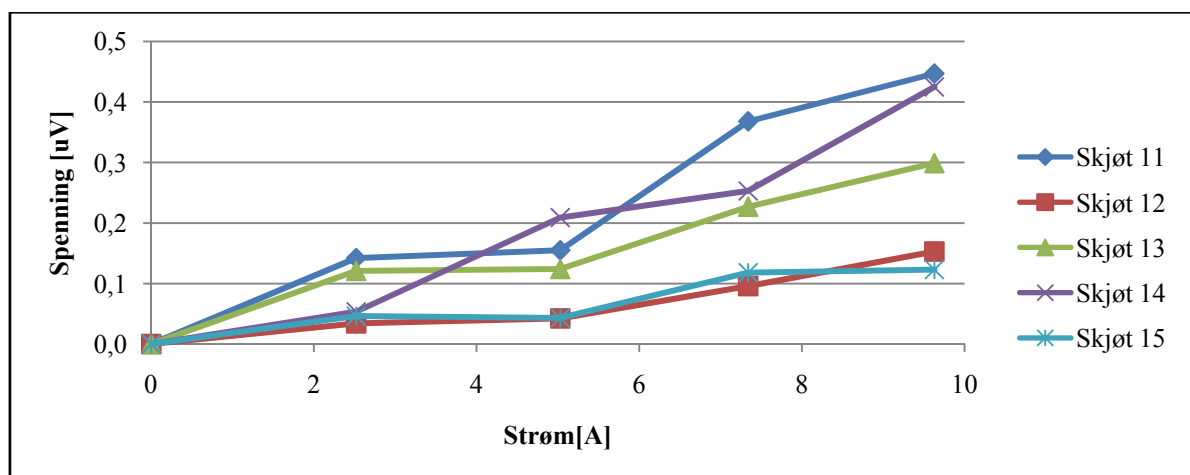
Forsøk ble gjort ved å sjekke motstanden over skjøter og spoledeler ved en strøm på opptil 10A. Strømmen ble endret i steg på 2,5A fra 0A til 10A. Målingen ble tatt etter at systemet hadde stabilisert seg på de forskjellige strømnivåene, og det ble brukt et gjennomsnitt av 20 målinger tatt over en periode på 10 minutter for hvert strømnivå. Målingene tatt uten at det gikk noen strøm, ble trukket fra de øvrige målingene for å kompensere for offsetverdier. Resultatene fra målingene av skjøtene ble delt i tre plot for å bedre oversikten. Figur 5-4, Figur 5-5 og Figur 5-6 viser resultatene fra målingene.



Figur 5-4 Resultater fra spenningsmålinger gjort over skjøt 1-5



Figur 5-5 resultater fra spenningsmålinger gjort på skjøt 6-10

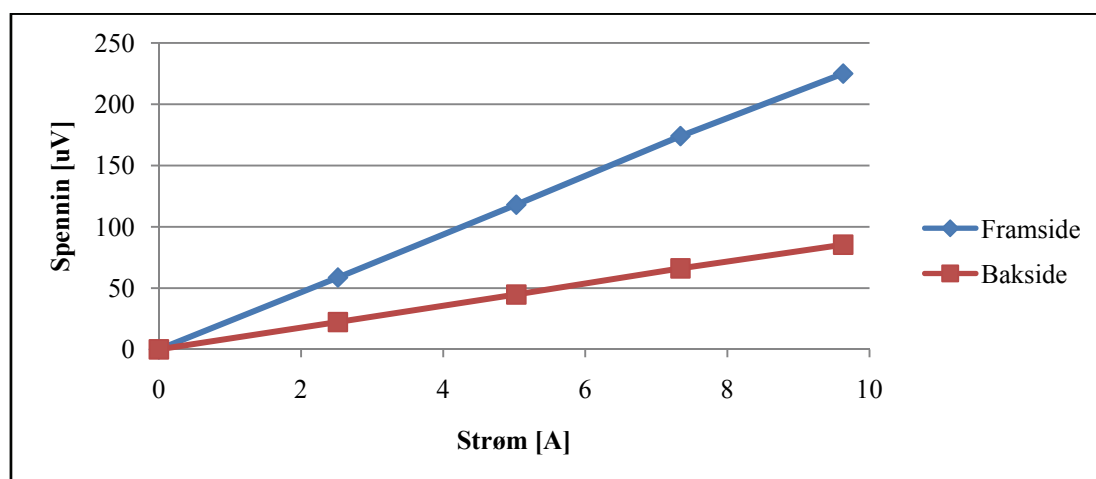


Figur 5-6 Resultater fra spenningsmåling gjort på skjøt 11-15

Ved en konstant motstand i skjøtene vil grafene for de forskjellige skjøtene være lineær. I figurene følger ikke alle grafene en lineær profil, noe som kan komme av at de spenningene som er målt er svært lave og derfor utsatt for støy. Under skjøtingen av superlederne var det problemer med skjøt nr 1, dette gjenspeiles ikke i motstandsmålingene. Det antas derfor at skjøt nummer en ikke tok skade av problemene som oppstod. Av figurene kommer det også frem at noen av målepunktene registrert ved en strøm på ca 2,5A ble negative.

Årsaken til at disse ble negative er lave verdier på spenningen. Det ble gjort flere forsøk, og under alle forsøkene kom enkelte punkter under 0 ved lave strømmer. Spenningen som er målt på 0A overstiger da spenningen som ble målt ved de negative punktene. Ingen av skjøtene viser tegn til quench. Siden skjøtene er ca 10cm, blir spenningsfallet under 50nV/cm for alle skjøtene. Motstanden til alle skjøtene ved de forskjellige strømnivåene er gitt i Vedlegg 19.

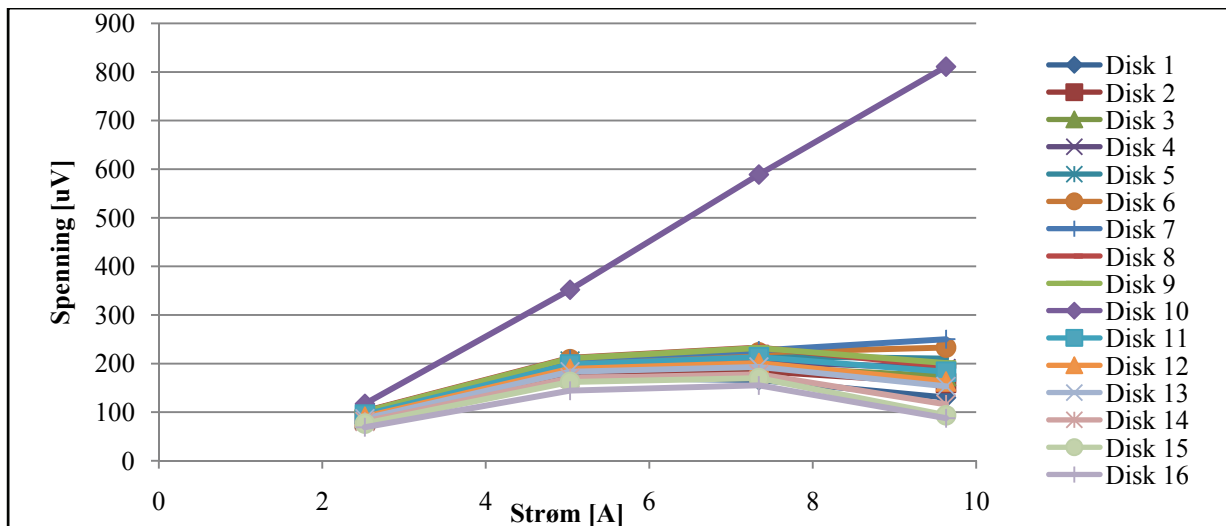
Samlet motstand for alle skjøtene ved 9,63A var 484nΩ. Med 200A vil den samlede effektutviklingen i skjøtene være på 19,36mW. Gjennomsnittelig effektutviklingen i hver skjøt vil ligge på 1,29mW. Resultatene fra spenningsmålingene gjort over skjøtene mellom spolen og lederstaven er gitt i Figur 5-6.



Figur 5-7 Resultater fra spenningsmåling over skjøtene mellom spolen og lederstavene

Spenningen over skjøtene har en lineær karakteristikk. Motstanden for fremsiden er på 8,9uΩ, mens på baksiden er den 23,4uΩ. Resultatene fra testen skiller seg markert fra utregningen gjort i kapittel 3.5, der kobbermotstanden ble beregnet til 18nΩ på baksiden og 3nΩ på fremsiden. Temperaturen var ifølge termoelementet på baksiden 24K, mens den på fremsiden var 26K. Det er en forskjell i ledningsevnen for kobberet mellom 24K og 26K, noe som gir en høyere motstand enn ved 20K. Den virkelige temperaturen antas imidlertid å være lavere, da forskjellen mellom termoelementene og Cernox sensoren var stor.

Siden forskjellen i motstandene er såpass stor, antas det derfor at den ligger i overgangen mellom lederstaven og kobberet eller mellom kobberet og spolen. Ved en strøm på 200A, vil effektutviklingen på fremsiden være på 0,97W og 0,36W på baksiden. Spenningen målt over de individuelle diskene er gitt i Figur 5-8. Disk en ligger inntil grenseflate en på fremsiden av kryostaten.

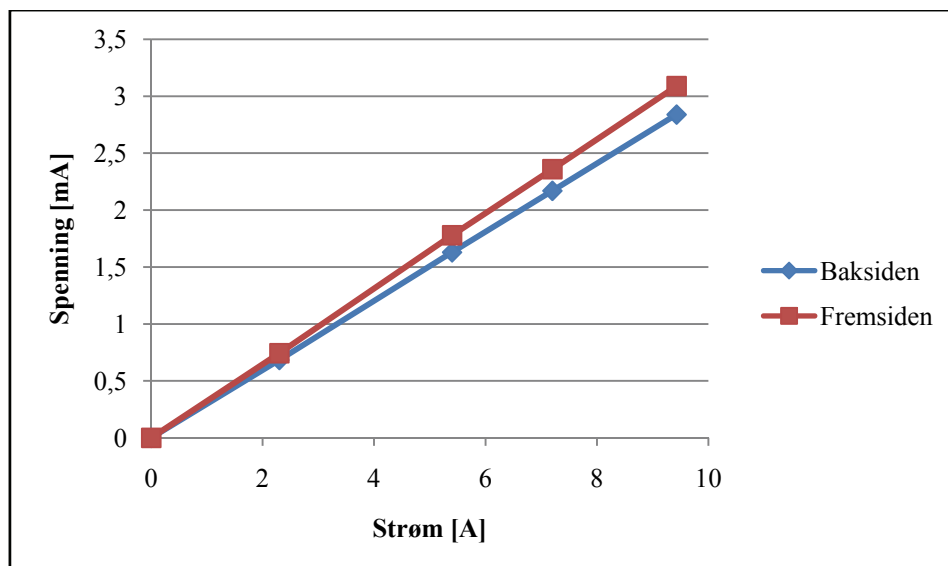


Figur 5-8 Resultater fra spenningsmålinger gjort over hver disk

Spenningsene over hver disk hadde større utslag fra sin 0 verdi enn spenningen over skjøtene. Dette kommer av at hver disk har en superlederlengde på 550m, og vil derfor være mer utsatt for støy og mindre endringer i strømmen. Motstanden skal under normale omstendigheter ligge rundt null for diskene. Det viser seg imidlertid at motstanden varierte etter tidspunktet målingen ble tatt. Ettersom en liten endring i strømmen gir utslag på målingen, noe som kan vises i formel (1.3). Disse målepunktene dikterte også spenningen over hele spolen, da de hadde store utslag ved små endringer i strømmen. Det var imidlertid en disk som skilte seg markant fra de andre. Den hadde en lineær profil på strøm spenningskurven, noe som tilsier en konstant motstand. Motstanden over disken ble beregnet til  $70\mu\Omega$  ved 5A,  $80\mu\Omega$  ved 7,3A og  $84\mu\Omega$  ved 9,6A, hvis en bruker 0 som referanse. Hvis man ser på forskjellen i motstand mellom disk 10 og de andre diskene, er motstands forskjellen  $10,9\mu\Omega$  ved 2,52A,  $32,5\mu\Omega$  ved 5,02A,  $53,1\mu\Omega$  ved 7,34A og  $66,6\mu\Omega$  ved 9,63A. Trenden er høyere motstands forskjell ved høyere strøm.

Med en motstand på  $66,6\mu\Omega$  vil effektutviklingen være på 2,66W ved 200A. Denne effektutviklingen vil føre til en økt temperatur, noe som igjen kan føre til en quenched. Årsakene til denne motstanden kan være brudd eller skade på superlederen. Formel (1.6) gir formelen for motstand i en leder. Kobberet i superlederen har et areal på  $0,35\text{mm}^2$ . (21) Hvis en tar utgangspunkt i motstanden og antar en temperatur på 20K ved skaden, kan lengden som strømmen går i kobber beregnes. Dette forutsetter at det på den lengden ikke er noen filamenter som er intakte, og at all strømmen går i kobberet. Utregninger gjøres med formel (1.6). Ved å sette inn  $1,92 \cdot 10^{-10} \Omega\text{m}$  for  $\rho$  blir lengden 12,1cm med kobberleder.

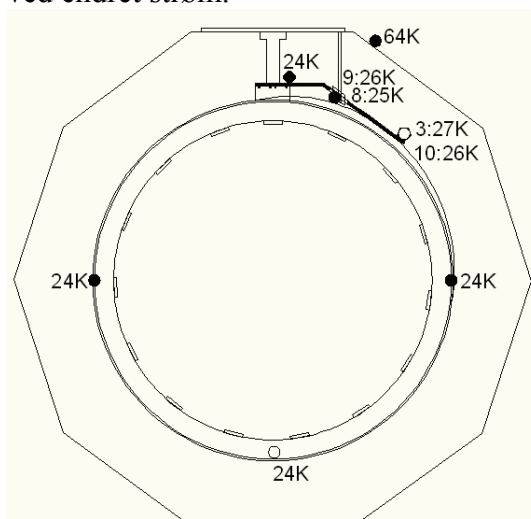
Spolen med den høye motstanden ligger som nr 10 av 16 spoledeler, og ligger derfor nesten i midten. Dette skal ikke ha noen betydning for temperaturen, da det ikke er noen varmekilder utenom spolens selvoppvarming. Det kan derfor antas at det er en defekt i spolen som forårsaker motstanden. Skjøt 9 og 10 som spoledel 10 er festet til viste ikke samme spenningsoppbygging. Figur 5-8 Viser spenningen mellom lederstavene og terminalene på kryostaten.



Figur 5-9 Resultater fra spenningsmålinger gjort mellom lederstavene og terminalene på kryostaten

Motstanden mellom lederstavene og klemmene på baksiden og fremsiden er henholdsvis  $301\mu\Omega$  og  $327\mu\Omega$ . Komponentene og overgangene som bidrar til denne motstanden er lederstaven, overgangen lederstaven og kobberskinnen i toppen av kryostaten og kobberdelen som går ut til klemmene. Ved 200A strøm blir spenningsoppbygningen som følge av disse motstandene på henholdsvis 60,2mV og 65,4mV. Effektutviklingen blir på 12,04W og 13,08W.

Under testene var temperaturen på Cernox sensoren henholdsvis 6,64K ved 10A og 6,4K ved lavere strømmen. Motstanden i Cernox elementet er  $4193\Omega$  ved en temperatur på 6,5K. Spenningen over Cernox elementet skulle ligge på 2mV, dette gir en strøm på 476nA. Temperaturfordelingen på termoelementene var slik Figur 5-10 viser. Det ble ikke registrert noen endring i temperatur ved endret strøm.

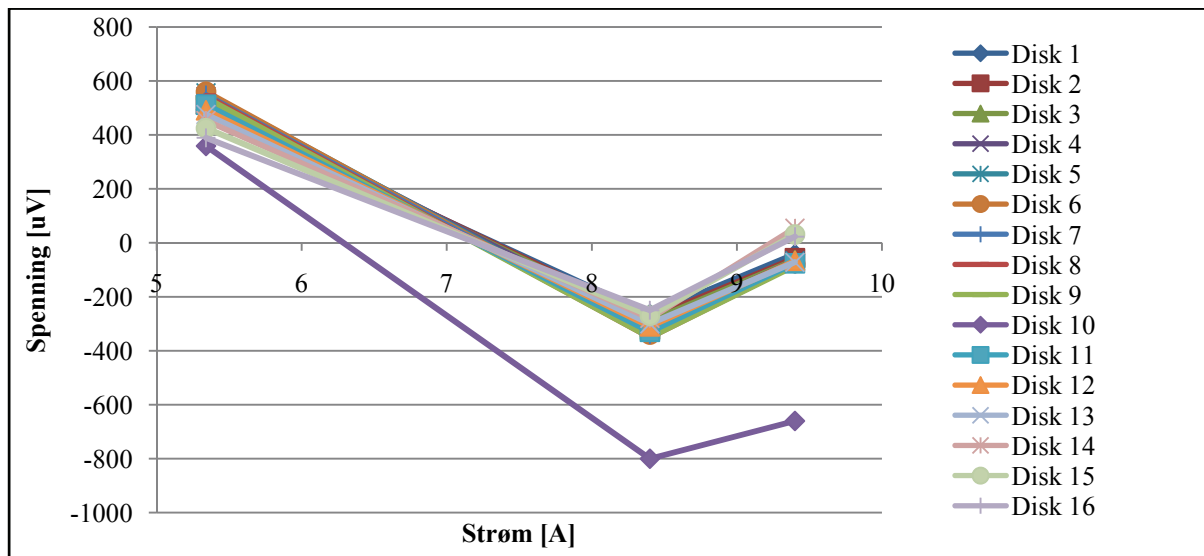


Figur 5-10 Temperaturfordeling ifølge termoelementene

Termoelement 3 og 10 viser 27K og 26K. Disse står på samme plass som Cernox sensoren, som viste 6,4K og 6,6K.

Siden motstanden over en av diskene lå såpass mye over de andre, ble det utført en test til for å verifisere resultatet. Testet ble gjennomført på identisk måte. Men spenningen som ble brukt

var 5,34A, 8,4A og 9,4A. Siden motstandene i skjøtene hadde såpass lave verdier, ble de ikke inkludert i de endelige resultatene. Resultatene fra diskene er gitt i Figur 5-11.



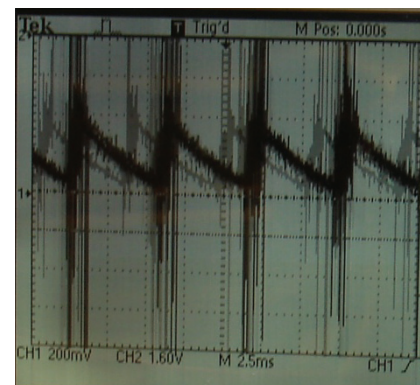
Figur 5-11 Spenningen over spoledelene ved forskjellige strømstyrker

Spoledel 10 har en markert forskjellig oppførsel fra de andre. Forskjellen i målt motstand mellom disk 10 og gjennomsnittet av de andre diskene er på henholdsvis  $27,2\mu\Omega$  ved 5,34A,  $58,4\mu\Omega$  ved 8,4A og  $64,9\mu\Omega$  ved 9,4A. Motstanden over de andre diskene antas å ligge på null ohm. Motstanden øker også ved denne testen ved økende strømstyrke. Årsaken til at noen punkter ligger over null, mens andre ligger under er fortegnet på di/dt.

## 5.5 Test av strømkilde på alternativ krets

Under begge testene viste resultatene at strømkilden koblet ut kontakten ved en resistiv motstand på ca 5V. Strømmen hadde også en rippel på ca 150Hz. Rippelen vises i Figur 5-12. Rippelen antas redusert ved en høyere induktans.

Signalet I ut ble liggende konstant mellom 1 og 2 volt, og var dermed ikke et pålitelig mål på strømmen i kretsen. Q signalet begynte på ca 1,5V ved null strøm, mens det økte til ca 5V før kontakten slo ut. Dette stemte ikke overens med den resistive spenningen som oppstod i kretsen. Ble strømmen økt, økte Q til den var lik den resistive spenningen i kretsen. Da disse to var like, slo kontakten ut. Det ble ikke funnet noen årsak til denne oppførselen, men det antas at det er noe galt med strømkilden.



Figur 5-12 Rippel på strømmen fra strømkilde under bruk av alternativ krets



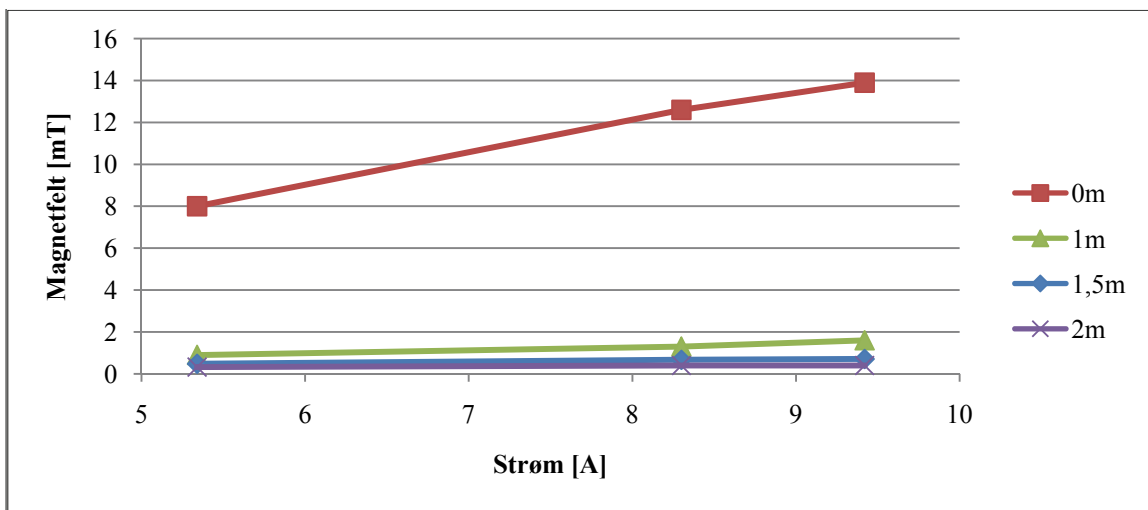
## 5.6 Test av strømkilde på superledende spole

Strømkilden koblet ut kontaktoeren umiddelbart ved påslag av strømkilden under dette forsøket. Den gikk ikke noe strøm i kretsen, men var antydning til reaksjon ved påslag. Dette var imidlertid såpass kort at det ikke kan konkluderes noe fra det. Strømkilden fungerte dermed ikke som den skulle med hensyn på spolen.

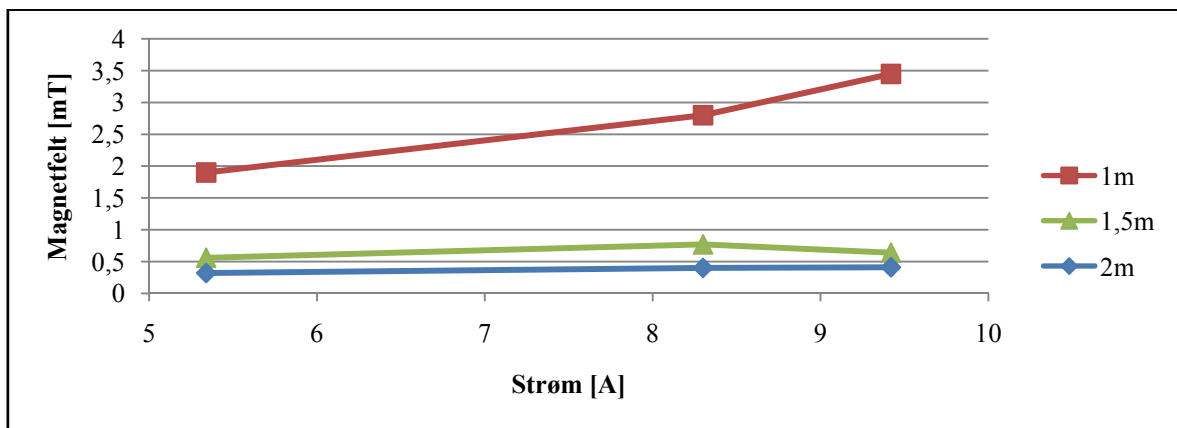
## 5.7 Feltemåling

Resultatene fra feltemålingen er gitt i

Figur 5-13 og Figur 5-14. Avstanden i z retning angir avstandene fra kryostatens ytterside, mens i r retning er det avstanden fra spolens midtpunkt som er gitt.



Figur 5-13 Magnetfelt som en funksjon av strøm ved forskjellige avstander i Z retning



Figur 5-14 Magnetfelt som en funksjon av strøm ved forskjellige avstander i r retning

Grafene viser en tilnærmet lineær profil, men i r retning ved målinger tatt 1,5m fra midten er målingen tatt med en strøm på 9,4A lavere enn målingene tatt ved 8,3A. Dette er en feil som kan komme av feil avlesning, feil på Gaussmeteret eller andre ytre påvirkninger. De høyeste målingene er tatt helt inntil kryostatens baksiden, hvor feltet øker med ca 1,5mT/A. Siden feltet øker lineært med strømmen, vil det ved 200A være et felt på 0,3T på dette punktet. Vedlegg 20 viser et felt på 10mT ca 2m fra midten på spolen. I målingen tatt i radiell retning, er feltet 0,32mT ved en strøm på 5,34A på en avstand 2m fra midten på spolen. Dette gir et felt som endres med 59,9uT/A. Ved 200 ampere blir feltet med målte verdier på 11,99mT.

## 5.8 Temperaturmålinger under oppvarmingen

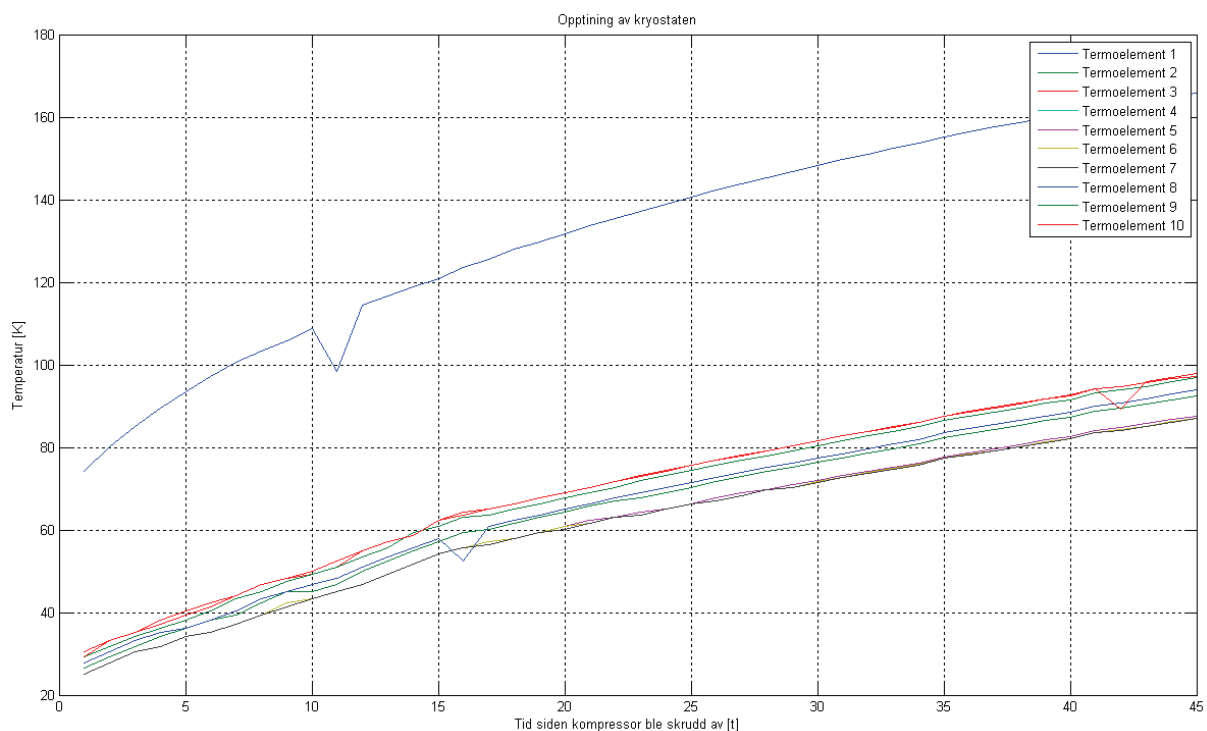
Under tidligere tester hadde spriket mellom den målte temperaturen på Cernox sensoren og målt temperatur på termoelementene vært store. Dette gav grunnlag for å sjekke om Cernox sensoren virkelig endret motstand ved endret temperatur. Det ble derfor tatt to målinger av både temperaturen på termoelementene og motstanden i Cernox elementet. Målingene ble tatt over en tidsperiode på 1min.

Tabell 5-3 Resultater fra temperaturmålinger gjort under oppvarmingen

Cernox motstand [ $\Omega$ ]	Termoelement 3 [K]	Termoelement 10 [K]
433,74	88,5	88,7
432,12	88,5	88,7

For temperaturer over 45K, er det bare motstanden ved 77K og 305K som foreligger fra kalibreringsrapporten for Cernox sensoren. Ved 77K er motstanden på Cernox elementet 356 ohm. (17) Siden Cernox sensoren har en høyere motstand enn dette, indikerer det en lavere temperatur enn 77K. Forskjellen mellom det Cernox sensoren viser og det termoelementene viser er under denne målingen på minst 11,5K. Dette gir imidlertid ingen indikasjon på at Cernox sensoren er skadet, da motstanden har sunket etter at temperaturen har steget.

Temperaturen fra termoelementene ble logget under opptiningen av kryostatet. Resultatet er gitt i Figur 5-15.



Figur 5-15 Målt temperatur på termoelementene under opptining

Etter 45 timer ble det ikke logget flere temperaturer, siden prosjektperioden var over. Termoelement nummer 6 hadde en temperatur på 25K ved avslag av kompressoren, og 87K etter 45 timer. Dette gir en endring på 1,37K/time. Hvis temperaturen endres med samme hastighet, vil det ta 194 timer før termoelement 6 viser en temperatur på 293K (20°C).

## 6 Diskusjon

Under monteringen av spolen ble rekkeklemmene til spenningssystemet satt på kjøledelen som også skulle kjøle skjøtene og overgangen mellom spolen og lederstaven. Plasseringen av rekkeklemmene kunne vært mer gjennomtenkt, da de kom i veien for kjølingen av skjøtedelene mellom spolen og lederstavene. Hvis disse hadde blitt plassert på et mer egnet sted, kunne kjøling mellom lederstavene og spolen muligens blitt enklere. Skjøten mellom lederstavene og spolen ble skrudd fast i lederstavene og limt fast til andre spoledeler. Lederstaven ble derfor lite fleksible og posisjonsendring på spolen kan forplante seg til lederstavene som er svært skjøre. Ved transport av spolen anbefales det derfor at lederstaven skrur løs fra skjøten, slik at disse ikke blir skadet.

I forkant av ferdigstillingen av den store kryostaten var planen å lage en større gjennomføring til termoelementene hvor det kunne settes inn flere elementer. Mangel på tid gjorde at samme gjennomføring ble brukt under både kalibreringstestene og på den store kryostaten. Det ble derfor bare plass til 10 termoelementer. Dette begrenset antall målinger. Plasseringene kunne også vært bedre, da det ikke var noen som stod direkte på skjøtene. Faren for å skade skjøtene ved denne plasseringen var tilstede, men liten. Hvis termoelementer skal brukes i videre arbeid, anbefales det at de forankres enda bedre enn det gjort i dette prosjektet. Praktisk vil dette si å lime dem fast over et lengre stykke enn 10cm. Limet burde også være rennende under limingen for å sikre at de får god termisk kontakt. Årsaken til at termoelementene kun ble sett på som en indikasjon på temperaturprofilen var Cernox sensorens pålitelighet. Sensoren har fungert under alle testene og gav naturlige verdier for laveste temperatur under kalibreringstestene. Den ble i tillegg testet etter at den var montert i kryostaten ved romtemperatur, og under opptiningen av kryostaten. Endringen av spenningen over termoelementene som følge av temperaturendring reduseres sterkt ved kryogeniske temperaturer. Det anbefales derfor å bruke andre typer temperaturfølere enn termoelementer type T for temperaturmålinger under 20K. I det videre arbeidet med kryostaten, burde termoelementene og Cernox sensoren sjekkes for mulig feil før bruk. Temperaturforskjellen disse har vist er betydelig.

Spenningsmålingene gjort over kobberdelen mellom lederstavene og spolen kunne med fordel blitt delt i to, da denne målingen dekker to skjøter. En måling mellom staven og kobberdelen og en mellom kobberdelen og spolen. Hvis det oppstår et problem i dette området, vil en ikke ut fra systemet kunne se i hvilken av disse overgangene problemet har oppstått. Et ekstra målepunkt på kobberdelen ville gitt den nødvendige oppløsningen på målingene. Resultatene fra skjøtemålingene kan sammenlignes med resultatene fra Frode Sætres diplomoppgave fra 2008. Resultatene fra de siste testene han foretok, var skjøtemotstand på hhv  $37n\Omega$  og  $48n\Omega$ . Disse resultatene stemmer overens med de som er funnet under testingen med en strøm opp til 10A.

Strømkilden fungerte ikke som den skulle, ved at ikke I ut eller Q gav fornuftige signaler. Under forsøkene ble det derfor brukt en strømtang og en transfoshunt for å måle den virkelige strømmen i kretsen. I videre arbeid burde strømforsyningen gjennomgås for å finne eventuelle feil som førte til disse signalene. Den resistive spenningsgrensen på 5V er også for høy for bruk på den superledende spolen ved høye strømmer. Ved en strøm på 200A, må det utvikles en effekt på 1kW i spolen for at strømforsyningen skal koble fra.

Resultatene viste at en av spoledelene har en markert høyere motstand enn de andre spoledelene, og bør i den forbindelse bli koblet bort. En metode dette kan gjøres på, er å bruke plassen foran delen som kjøler skjøtene. Der skal det være tilstrekkelig med superlederbånd og plass til å lage en skjøt mellom skjøt 9 og 10. Skjøten kan enten lages ved å klippe superlederen før den kommer inn til skjøt 9 og lodde den frie enden fast i superlederen som går inn til skjøt 10. Kjøling av denne skjøten kan imidlertid bli en utfordring.

Alternativt kan det bare lages en skjøt ved å lodde fast et stykke superlederbånd på samme plassering. Strømmen vil da gå gjennom skjøten såfremt denne har mindre motstand enn disk 10. Under loddingen kan de opprinnelige skjøtene bli påvirket, men siden de er limt inne med epoksy, burde dette ikke være noe problem. Det burde i den forbindelse settes på to ekstra spenningsmålingspunkter, et på skjøten og et mellom skjøten og kjøleplaten. Hvis det de opprinnelige spenningsmålingspunktene kan brukes slik de står, vil dette gi målinger på alle skjøtene. Hvis dette gjøres, anbefales det også å forankre termoelementene enda bedre. Noe som kan gjøres ved å lime dem til et større område. Det vil også være lurt og sette inn et termoelement på skjøtene, hvis dette lar seg gjøre.

## 7 Konklusjon

I løpet av prosjektperioden ble kryostaten ferdigstilt og kjølt ned til under kritisk temperatur for superlederen. Temperaturen i kryostaten sank gjennom hele nedkjølingsperioden og stabiliserte seg etter ca 120 timer. Temperaturen på spolen lå under 27K på alle målepunktene under tester med strømstyrke opp til 10A. Cernox sensoren stabiliserte seg på ca 7K. Det viste seg imidlertid vanskelig å få gjort pålitelige målinger av temperaturprofilen med termoelementene i nedkjølt tilstand. Disse ga vesentlig forskjellig temperatur fra Cernox sensoren.

Samlet motstand for alle skjøtene ved 9,63A var 484nΩ. Med 200A vil den samlede effektutviklingen i skjøtene være på 19,36mW, forutsatt at ingen av skjøtene endrer motstand ved endret strømstyrke. Ingen av skjøtene viste tegn til skader. Det ble ikke observert noe klar indikasjon er på at temperaturen steg ved økt strøm. Kjølingen antas derfor å være tilstrekkelig.

Resultatene av motstandstestene over diskene viser at selv om spolen er superledende er det en disk som har vesentlig høyere motstand enn de andre. Denne disken antas å være skadet, noe som medfører en motstand på 66,6uΩ ved 9,63A. Effektutviklingen fra denne spoledelen vil være på 2,66W ved en strøm på 200A. Dette forutsetter at ikke motstanden endres med tiden eller strømstyrken, noe den har vist tegn til å gjøre.

Motstanden over skjøtene mellom spolen og lederstavene er funnet til å være henholdsvis 23,4uΩ og 8,9uΩ. Effektutvikling fra disse ved 200A blir dermed 1,29W. Motstanden over disk nr 10 var 66,6uΩ ved 9,6A. Hvis en forutsetter at denne motstanden holder seg jevn opp til 200A, vil effektutviklingen fra denne spoledelen være på 2,66W. Den totale effektutviklingen fra lederstav til lederstav blir dermed 3,95W. Tas effekten fra lederstavene til klemmene med, blir den totale effektutviklingen på 29,07W. Effekten vil gi en spenning over klemmene på 145mV. Spenningsoppbygningen antas imidlertid å bli høyere, tatt i betraktning av ulineariteten til motstanden funnet i disk nummer 10.

Spolen satte opp et felt som stemte med feltberegninger gjort av Niklas Magnusson., og ville blitt ca 12mT ved en strøm på 200A og en avstand 2m fra midten av spolen. Induktansen ble funnet til å være 4,9H.

Tiden avsatt i prosjektperioden gikk i hovedsak til praktiske problemstillinger knyttet til ferdigstilling av kryostaten. Hadde den spesialkonstruerte strømkilden fungert, ville det gitt grunnlag for flere tester. Da kunne kritisk strøm ved forskjellige temperaturprofiler blitt laget, og yterligere tester av spolen med defekten hadde vært mulig. Dette lot seg imidlertid ikke gjøre, da strømkilden ikke fungerte som den skulle.

## 8 Referanser

1. **M. Runde, A. Stenvall, N. Magnusson, G. Grasso, R. Mikkonen.** *MgB<sub>2</sub> coils for a DC superconducting induction heater.* s.l. : IOP Publishing Ltd, 2007.
2. **M. Runde, K. Gamlesæter, J. O. Skarpmes, E. Styrken.** *Superledende materialer i elkraftteknikken.* s.l. : EFI, 1988.
3. supercables. [Internett] [Siteret: 17 05 2009.]  
<http://www.supercables.com/superconductivity.html>.
4. *The Sensible Superconductor.* **Das, Saswato R.** July, s.l. : IEEE Spectrum, 2002.
5. **A. Stenvall, A. Korpela, R. Mikkonen, G. Grasso.** *Quench analysis of MgB<sub>2</sub> coils with ferromagnetic matrix.* s.l. : Supercond. Sci. Technol.
6. **Peter R.N. Childs, B.Sc. (Hons), D.Phil., C.Eng., F.I.Mech.E.** *Practical Temperature Measurement* . s.l. : Elsevier Ltd., 2001. ISBN: 978-0-7506-5080-9 .
7. **L. Michalski, K. Eckersdorf, J. Kucharski, J. McGhee.** *Temperature Measurement Second Edition.* Chichester : John Wiley & sons Ltd., 2001. ISBN 0 471 86779 9.
8. Wikipedia. *Resistance thermometer.* [Internett] [Siteret: 13 2 2009.]  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Resistance\\_thermometer](http://en.wikipedia.org/wiki/Resistance_thermometer).
9. **Olsen, Rolf Ø.** *Grunnleggende industriell måleteknikk.* s.l. : Elektrokurs konsulet Rolf Ø. Olsen, 1999.
10. **RL Rusby, M Kempson.** *Cryogenic temperature measurement.* Paris : Rev Gen Therm, 1996.
11. **C. J. Yeager, S. S. Couts.** *A Review of Cryogenic Thermometry and Common Temperature Sensors.* s.l. : IEEE Sensor journal, 2001.
12. **Skjølberg, Johan K.** *Masteroppgave: Superleder for induksjonsoppvarming.* Trondheim : NTNU, 2005.
13. **Magnusson, Niklas.** *AC Losses in High-temperature Superconducting Tapes: Calorimetric Measurement System and Semi-empirical Modelling.* Stockholm : Kungl Tekniska Högskolan, 2000. ISSN:1100-1593.
14. **Hough D. Young, Roger A. Freedman.** *University Physics 11th edition.* s.l. : Pearson, Addison Wesley, 2004. ISBN:0-321-20469-7.
15. HTS-110 Magnetic solutions. [Internett] [Siteret: 14 04 2009.]  
<http://www.hts110.co.nz/our-products/products-sub-page/>.
16. **Sætre, Frode.** *Splicing and Coil Winding of MgB<sub>2</sub> Superconductors.* s.l. : NTNU, 2008.

17. **Inc, Lake Shore Cryogenics.** *CALIBRATION CERTIFICATE, Report Number: 519118.* 2008.
18. **Ltd., Sumitomo Heavey industries.** *Technical Instructions RDK-408S 10K Cold Head.* Tokyo : SHI, 2006.
19. **Jelinek, Zdenek.** *Current supply and dump resistor ALUHEAT project Instructions for use.* s.l. : Mottatt på mail, 2009.
20. **Vyzkum, Skoda.** *ALUHEAT Deliverable 27: Fully functional prototype current feeding system for the induction heater.* s.l. : ALUHEAT.
21. MgB<sub>2</sub> Multifilamentary stabilizd tape . *Columbus Superconductors.* [Internett] [Sitert: 07 06 2009.] <http://www.columbussuperconductors.com/img/tape.gif>.
22. **Lake Shore Cryotronics, Inc.** Lake Shore Cryotronics, Inc. [Internett] 2007. [Sitert: 5 4 2009.] <http://www.lakeshore.com/temp/sen/crtdts.html>.
23. efunda. [Internett] [Sitert: 20 05 2009.] [http://www.efunda.com/materials/elements/TC\\_Table.cfm?Element\\_ID=Cu](http://www.efunda.com/materials/elements/TC_Table.cfm?Element_ID=Cu).
24. *Mottat på mail fra Niklas Magnusson.* 18.05.2009.

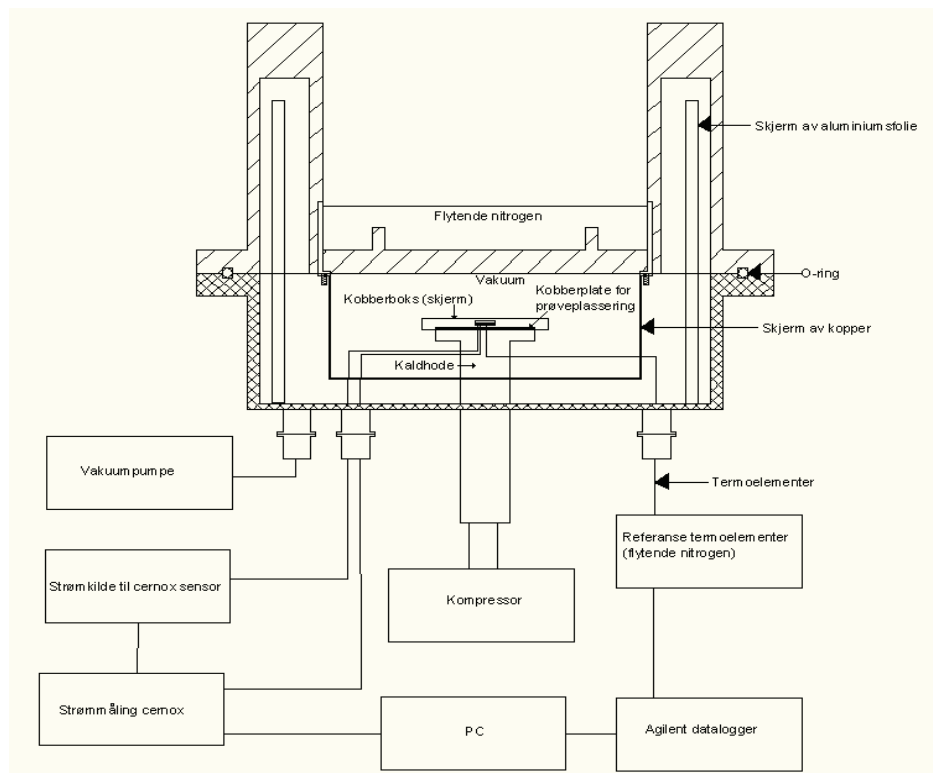
## 9 Vedleggsliste

Vedlegg 1	Kalibrering av termoelementer.....	48
Vedlegg 1.1	Resultater .....	50
Vedlegg 1.2	Diskusjon av kalibreringstestene .....	52
Vedlegg 1.3	Konklusjon vedrørende kalibreringstestene.....	53
Vedlegg 2	Referansetabell for termoelement type T .....	54
Vedlegg 3	Matlab kode for plotting av kalibreringsresultater.....	56
Vedlegg 4	Resultater fra kalibreringstest 1 og 2.....	57
Vedlegg 5	Utrekning av varmeledning.....	61
Vedlegg 6	Kjøledel for kjøling av skjøter .....	62
Vedlegg 7	Kjøleplate påmontert kryostat. ....	63
Vedlegg 8	Lederkoder på spenningssystemet.....	64
Vedlegg 9	Tegning av HTS-110 leder .....	67
Vedlegg 10	Deler for skjøting av spole og HTS leder på fremsiden. (alle mål i cm) .....	68
Vedlegg 11	Skjøt mellom lederstav og spole på baksiden .....	69
Vedlegg 12	Del for kjøling av skjøten mellom lederstav og spole på baksiden.....	70
Vedlegg 13	Fjærmekanisme for bruk på baksiden .....	71
Vedlegg 14	Plassering av termoelementer, Cernox sensor og varmesluk .....	72
Vedlegg 15	Tegning av gjennomføringsplate til termoelementene.....	73
Vedlegg 16	Instrumentliste .....	74
Vedlegg 17	Strømkilden .....	75
Vedlegg 17.1	Pinn oversikt .....	75
Vedlegg 17.2	Koblingsskjema for strømkilde og spolen .....	75
Vedlegg 18	Testoppsett .....	76
Vedlegg 19	Matlab program for beregning av Cernox temperatur .....	77
Vedlegg 20	Feltfordeling .....	78
Vedlegg 21	Motstanden over skjøtene gitt i $n\Omega$ .....	79
Vedlegg 22	Matlab kode for plotting av temperaturer under kjølingen .....	80
Vedlegg 23	Temperaturprofil på kryostaten under nedkjøling.....	81
Vedlegg 24	Temperaturprofil nedkjøling av kryostat uten montert spole.....	82



## Vedlegg 1 Kalibrering av termoelementer

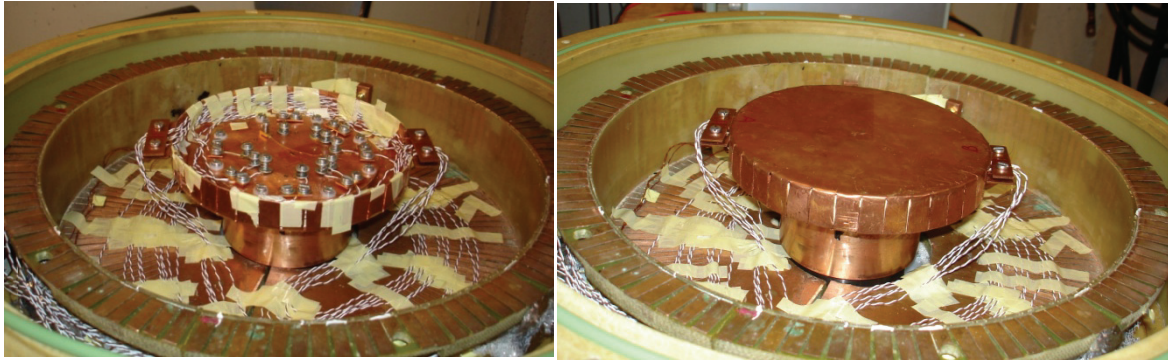
Termoelementer gir en standardisert potensialforskjell ved forskjellige temperaturer, men siden elementene som skulle brukes i kryostaten både skulle avisoleres og gå gjennom skjøter ble det besluttet å kalibrere dem før de ble satt i den store kryostaten. Kalibreringstestene ble utført ved å bruke en mindre kryostat og sjekke hvilke potensial termoelementene ga ved forskjellige temperaturer. Totalt ble det gjort to forsøk på å kalibrere termoelementene. Referansen som ble brukt var en kalibrert Lake Shore Cernox 1070-SD-4B, denne var kalibrert mellom 4K og 40K. Sensoren er av typen tynnfilm RTD og temperaturen måles derfor ved å føre en strøm gjennom den og måle spenningen over den. Under testingen ble oppsettet beskrevet under kapital 3.6 brukt. Figur V- 1 viser en prinsippsskisse av testkryostaten.



Figur V- 1 Prinsippsskisse for testkryostaten

Både termoelementene og Cernox sensoren ble festet til en plate av kobber som ble skrudd fast til kaldhodet. Termoelementer av typen T har en leder av kobber, noe som gjør dem god varmeledningsevne. De ble derfor termisk forankret i både kobberplaten og skjermen, samt i kobberskjermen som har kontakt med det øvre nitrogenlageret. Forankringene sørget for at minst mulig varme ble ledet inn til målepunktene, og ble gjort ved å tape dem med Tiordai tape til kobberet. Denne tapen viste seg etter utprøving å hefte godt i flytende nitrogen.

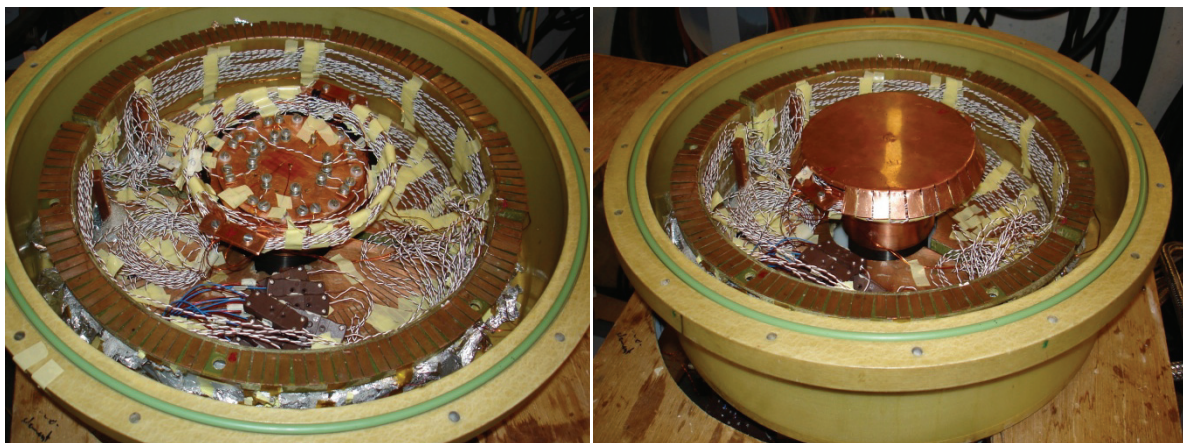
Optimalt burde det blitt brukt epoksy for å sikre god termisk kontakt, men siden termoelementene ikke skulle stå permanent i testkryostaten var dette ikke mulig. Figur V- 2 viser hvordan termoelementene ble lagt og forankret i kryostaten under den første testen.



Figur V- 2 Forankring av termoelementer i testkryostaten sett fra siden (venstre) og med kobberskjerm (høyre)

Termoelementene ble først festet i nedre del av kryostaten ved å tape dem fast. De ble i tillegg festet til veggen i kobberboksen der temperaturen antas isoterm. Termoelementene ble også festet mekanisk ved inngangen til kammeret og på selve testplaten med en skrutvinge. Selve målepunktet på termoelementene ble trykket mot kobberplaten med en skruefjær anordning. Alle termoelementene og Cernox sensoren ble satt i en ring rundt på kobberplaten. Mellom temperaturfølerne og kobberplaten ble det lagt et lag med Apizon N fett for å bedre den termiske kontakten.

Under test to ble oppsettet endret noe ved å innføre et varmeelement for bedre regulering av temperaturen, måten termoelementene ble forankret i kobberet ble også endret. Endringen kom etter forbedringspotensial funnet under test 1. Varmeelementet ble laget ved å lime en motstandstråd på 70 ohm per meter til kobberboksen som skjermet målepunktene. Forankringen ble endret ved å la større deler av termoelementenes lengde være tapet til kobberskjermen. Et av termoelement ble ikke forankret med tape til kobberet, dette ble gjort for å undersøke hvor effektivt forankringen fungerte. Figur V- 3 viser kryostaten før test 2. Varmeelementet kan skimtes som en svart ring på bilde til venstre.



Figur V- 3 Testkryostaten før test 2 med skjerm av (venstre) og på (høyre)

Registreringen av spenningen fra termoelementene og Cernox sensoren ble gjort med en Agilent datalogger. Strømmen gjennom Cernox sensoren ble logget med et multimeter fra Keithley. Programmet Datalogger 3 ble brukt for å registrere dataene fra Agilenten, mens KI-TOOL ble brukt for å registrere dataene fra multimeteret. Begge programmene registrerte alle målinger med tidspunkt, noe som muliggjorde sammenligning av resultater.

Under testingen var kildene til varme utenfra få og massen til det som skulle kjøles liten, noe som gjorde at temperaturen sank fort i den isoterme kobberboksen. Kildene til varme utenfra var først og fremst varmeledningen til termoelementenes ledere og to kobberstenger i det ytre kammeret av kryostaten. Til Cernox sensoren ble det brukt kobberledere med en diameter på 0,2mm.

For å få tilstrekkelig målepunkter for det aktuelle temperaturområdet, ble kjølehodet skrudd av og på. Målinger ble gjort under både temperaturstigningen ved avslåing av kjølehode og nedkjølingen ved påslag. Temperaturen falt meget raskt ved avslåing og økte meget raskt ved nedkjøling. Under den første testen ble målingene registrert med en frekvens på 0,25Hz, mens under test 2 ble en frekvens på 1Hz brukt. Under testingen viste det seg at ved å bytte polaritet på spenningskilden til Cernox sensoren endret målingene seg, polariteten ble derfor endret mellom hver måling. Motstanden i Cernox sensoren ble så regnet ut ved å ta gjennomsnittet av to påfølgende målinger, for termoelementene ble tilsvarende gjennomsnitt brukt. Strømmen over Cernoxen ble logget hvert 25ms, og gjennomsnittet for strømmen over et polskifte ble brukt.

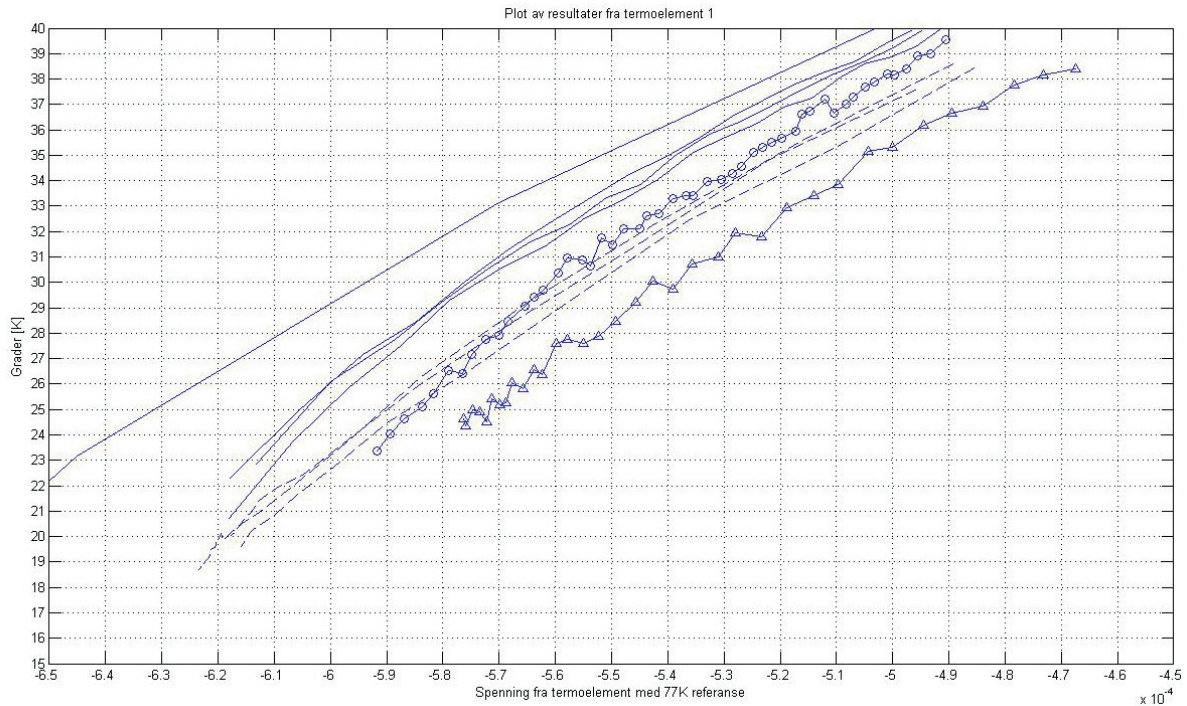
Resultatene ble tolket ved en tostegs prosedyre, hvor resultatene først ble hentet inn i EXCEL hvor motstander på cernox ble funnet og det ble opprettet matriser over motstanden på Cernox og tilhørende spenninger på termoelementene for hver måleserie. Matrisene ble så hentet inn i MATLAB hvor motstandene fra Cernox sensoren funnet under testingen ble interpolert med resultatene fra kalibreringsrapporten på sensoren. Spenningsmålingene fra termoelementene ble så plottet. Matlabkode for plotting er gitt i Vedlegg 3.

### **Vedlegg 1.1 Resultater**

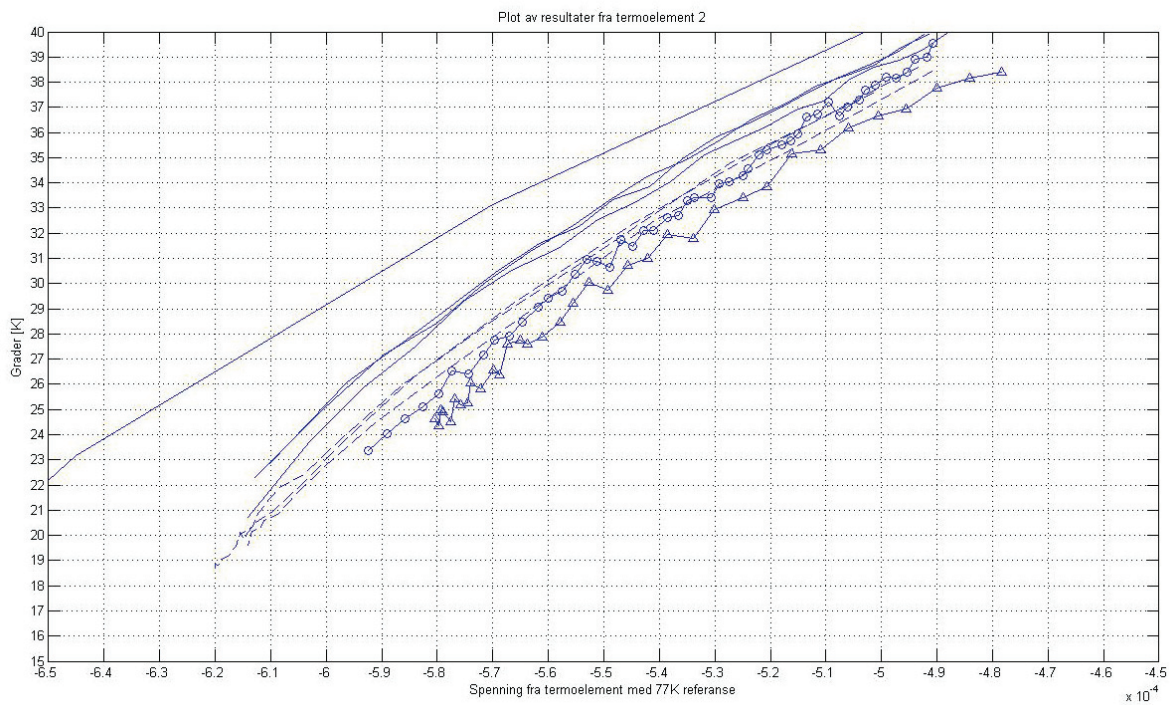
Under test 1 ble det klart at to av termoelementene ikke ga logiske resultater. Termoelement 3 hadde gått opp i sølvloddingen i referansebadet og termoelement 8 fungerte heller ikke. Antall elementer ble dermed redusert til 8 under den første testen.

Cernox sensoren ble brukt som en referanse og angir derfor temperaturen på kobberplaten under testingen. Plottingen av temperaturene til termoelementene er gjort ved å se hvilken spenning termoelementene ga ut ved de forskjellige temperaturene funnet med Cernox sensoren. For termoelementene er referansespenningen ved forskjellige temperaturer, gitt i Vedlegg 2. Referansespenningen er plottet for å sammenligne avviket mellom målt og antatt rett spenning ved forskjellige temperaturer. Resultatene fra både test 1 og test 2 er samlet for å gjøre sammenligningen best mulig.

Under test 2 viste det seg at varmeelementet ikke fungerte som forutsett og temperaturforskjellen mellom termoelementene ble større ved bruk av varmeelementet. Årsaken til dette antas å være forskjellen på avstanden fra de individuelle termoelementene og varmeelementet. Det ble imidlertid gjort to måleserier før varmeelementet ble tatt i bruk som kunne sammenlignes med test 1. Forskjellen mellom disse var frekvensen målingene ble gjort med, noe som gjorde antall målepunkter større for test 2. Figur V- 4 og Figur V- 5 viser resultatene fra kalibreringstest en og to for termoelement en og to. 0 viser resultater fra de øvrige termoelementene.



**Figur V- 4 Resultater fra kalibreringstest 1 og 2 for termoelement 1**



**Figur V- 5 Resultater fra kalibreringstest 1 og 2 for termoelement 2**

På grafen er den øverste linjen referansen fra Vedlegg 2, mens de tre linjene under den stammer fra målinger tatt under den første testen ved avskrudd kaldhode, temperaturen var da på vei opp. De tre stiplede linjene stammer fra den første testen med kjølehode på, temperaturen var da på vei ned. Linjen med runde markeringer angir målinger funnet under test 2 med kaldhodet skrudd av, og temperaturen på vei opp. Linjen med trekantede markeringer angir målinger funnet under test 2 med kaldhodet skrudd på og temperaturen på vei ned.

Avviket mellom spenningene termoelementene gav ut spriket med flere grader under test 1. Det samme avviket kom også frem under test to. Dette vises spesielt på termoelement nr 1 og nr 7 under begge testene. På termoelement nr 2, 4, 5, 6, 9 og 10 ble avviket mindre under test 2 enn under test 1. Under alle målingene viste termoelementene en lavere temperatur enn spenningsreferansen for termoelement type T. Hadde spenningsreferansen for termoelementene blitt brukt som indikasjon på temperatur, ville termoelementene vist en høyere temperatur.

Termoelement nr 10 ble ikke forankret i kobberskjermen under den andre testen, men viste ingen tegn til høyere temperatur enn de andre termoelementene. Bruk av tape for å forankre elementene til kobberskjermene var i så måte ikke suksessfullt. Annen forankring var imidlertid vanskelig, da termoelementene skulle settes i den store kryostaten i etterkant.

## **Vedlegg 1.2    Diskusjon av kalibreringstestene**

Under testingen ble det bare prøvd å forankre termoelementene på kobberet med teip, det kan imidlertid være det hadde lønnet seg å bruke mer tid på forankringsmetoden for å unngå varmeledning gjennom elementene. Termoelementene ble bare tapet fast til tynne kobberskjermer, hadde det blitt laget en egen kobberdel for forankring av termoelementene kunne denne sannsynligvis sørget for at det ikke varmeledningen til elementene hadde påvirket resultatene.

Målepunktet på termoelementene ble beskyttet med et lag epoksy, for å gjøre dem mer robuste mot mekaniske belastninger. Epoksyen gjorde målepunktene stive og kontakten med kobberplaten kan dermed ha blitt dårligere enn om epoksyen hadde blitt utelatt. Uten epoksy hadde målepunktet blitt mer elastisk og lagt seg bedre ned på kobberplaten ved bruk av skrutvingen. Under test nr 2 ble et varmeelement brukt som ikke fungerte. Årsaken var en kombinasjon av plassering og montering. Under monteringen ble det brukt tape for å holde motstandstråden på plass. Ved demontering viste det seg at der hvor tapen hadde vært festet var ikke kontakten mellom motstandstråden og kobberboksen god.

Plasseringen av motstandstråden var heller ikke optimal, da motstandstråden sannsynligvis varmet opp noen av lederne i termoelementene. Varmekilder langs termoelementtråden skal ikke påvirke målingen, men hvis denne varmen ledes til målepunktet vil målepunktet bli oppvarmet. Målt temperatur vil dermed ikke samsvar med temperaturen på objektet. Måleseriene tatt etter at motstandselementet ble tatt i bruk hadde såpass store avvik at det ikke hadde noen hensikt å bruke dem.

Under test 2 ble det tatt hyppigere målinger enn ved den første testen, noe som kan ha medført det store hystereseutslaget som vises på kurvene fra test 1. Siden målingene på Cernox sensoren endret seg ved endret strømretning, ble tiden mellom hvert målepunkt var 4 sek under den første testen. Temperaturen falt med 3 grader mellom de to første målepunktene på den første testen, noe som medførte få punkter mellom 20 K og 30 K ved avskrudd kaldhodet. Under nedkjøling var det få målepunkter mellom 30K og 40K, mens det ble flere mellom 30K og 20K.

Cernox sensoren er av typen tynnfilm motstandselement. Disse typene temperaturfølere har størst hysterese blant RTDene, og kan også ha medvirket til hysteresekurven for

termoelementene. I forsøket har imidlertid denne effekten blitt sett bort fra, da hysteresen varierte stort mellom de forskjellige termoelementene.

### **Vedlegg 1.3 Konklusjon vedrørende kalibreringstestene**

Selve kalibreringen viste seg å være vanskeligere enn antatt. Det er anbefalt at termoelementer kalibreres på stedet de skall stå. Dette lot seg imidlertid ikke gjøre. En av årsakene til avviket i målingene kan være forskjellig masse på termoelementene og Cernox sensoren. Forskjellig masse vil gi forskjellige tidskonstanter. De vil dermed ikke kjøles eller varmes opp i samme tempo og således burde målingene skje ved å endre temperaturen i små steg, slik at den kan stabiliseres før målingene tas. Dette kan forklare hysteresekurven som kommer frem i resultatene.

Responstiden til termoelementene er rask, men avhenger av massen på målepunktet og materialene i termoelementet. Mindre masse gir raskere respons. Responstiden til cernox sensoren er 1,5ms ved 4,2K og 50ms ved 77K (22). Epoksyen som ble brukt på termoelementene kan ha gitt dem forskjellig kontaktflate med kobberplaten på kaldhodet, dette kan ha ført til forskjellige målinger mellom termoelementene. Forskjellig kontaktflate kan også bidra til forskjellig respons ved at elementene med liten kontaktflate bruker lengre tid på å utjevne temperaturgradienten mellom kobberplaten og termoelementene.

Resultatene fra kalibreringen gir ingen entydig sammenheng mellom spenninger og temperaturer på termoelementene. Avviket mellom de forskjellige målingene er såpass stort at resultatene ikke kan brukes. Det ble derfor besluttet å kun bruke referansen for termoelementene som mål på temperaturen. Alle resultatene ligger under referansen, noe som betyr at de viser en lavere temperatur enn referansen ved samme spenning. Ved å velge å bruke referansen vil den avleste temperaturen fra termoelementene tolkes høyere enn hvis kalibreringsresultatene hadde blitt brukt.

## Vedlegg 2 Referansetabell for termoelement type T

(mottatt av Niklas Magnusson)

Tabell V- 1 Referansetabell termoelement type T

Temp °C	emk $\mu\text{V}$	Seebeckkoefficient $\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$	Temp °C	emk $\mu\text{V}$	Seebeckkoefficient $\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$	Temp °C	emk $\mu\text{V}$	Seebeckkoefficient $\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$
-270	-6258	1,0	30	1196	41,1	330	16624	59,3
-260	-6232	3,9	40	1612	42,0	340	17219	59,8
-250	-6180	6,3	50	2036	42,8	350	17819	60,2
-240	-6105	8,7	60	2468	43,7	360	18422	60,6
-230	-6007	10,9	70	2909	44,5	370	19030	60,9
-220	-5888	12,7	80	3358	45,3	380	19641	61,3
-210	-5753	14,3	90	3814	46,0	390	20255	61,6
-200	-5603	15,7	100	4279	46,8	400	20872	61,8
-190	-5439	17,1	110	4750	47,5			
-180	-5261	18,5	120	5228	48,2			
-170	-5070	19,8	130	5714	48,9			
-160	-4865	21,1	140	6206	49,5			
-150	-4648	22,3	150	6704	50,2			
-140	-4419	23,6	160	7209	50,8			
-130	-4177	24,8	170	7720	51,4			
-120	-3923	26,0	180	8237	52,0			
-110	-3657	27,2	190	8759	52,6			
-100	-3379	28,4	200	9288	53,1			
-90	-3089	29,5	210	9822	53,7			
-80	-2788	30,7	220	10362	54,3			
-70	-2476	31,8	230	10907	54,8			
-60	-2153	32,8	240	11458	55,3			
-50	-1819	33,9	250	12013	55,8			
-40	-1475	34,9	260	12574	56,3			
-30	-1121	35,9	270	13139	56,8			
-20	-757	36,9	280	13709	57,2			
-10	-383	37,9	290	14283	57,7			
0	0	38,7	300	14862	58,1			
10	391	39,5	310	15445	58,5			
20	790	40,3	320	16032	58,9			

### Tabellen ble referert til 77.3K, ved følgende Matlab kode

```
clc
clear
VT=[-6258 -6232 -6180 -6105 -6007 -5888 -5753 -5603 -5439 -5261 -5070
    -4865 -4648 -4419 -4177 -3923 -3657 -3379 -3089 -2788 -2476 -2153
    -1819 -1475 -1121 -757 -383 0 391 790];
% Referansen ved 0 grader celsius
T=[3:10:293]; %Angir temperaturer fra 3 til 293K
V77=interp1(T,VT,77.3,'linear'); %Finner spenningen som gir en
    temperatur på 77,3K

VT77=VT-V77; %Trekker spenningen ref 0'C
    fra spenningen ved 77,3K

ref77K_T=VT77*1e-6; % Angir at det er i uV

V=input('Hvilken spenning vil du se på (oppgi i uV)?'); %Kode som muliggjør
    fortløpende
Temperatur=interp1(VT3,T,V,'linear'); %sjekking av
    temperaturen på
    termoelementene
```

Det ble brukt lineær interpolasjon, siden dette ble brukt andre steder i rapporten blant annet for å finne kurver over strøm – spenning ved spenningsmålinger. Etter at koden var kjørt en gang ble Ref77K\_t lagt i en egen fil som ble brukt videre.



## Vedlegg 3 Matlab kode for plotting av kalibreringsresultater.

```
clc
clear
Cernox;
Resultater_T25;
Resultater_T26;
Resultater_T30;
Resultater_T31;
Resultater_T32;
Resultater_T33;
Resultater_T2_4;
Resultater_T2_5;
ref77K_T;
ref77(:,1)=ref77(:,1)*-1;
T25=Test25/(1E10);
T26=Test26/(1E10);
T30=Test30/(1E10);
T31=Test31/(1E10);
T32=Test32/(1E10);
T33=Test33/(1E10);
T2_4=Test2_4/(1E10);
T2_5=Test2_5/(1E10);
x=Cernox(:,2);
y=Cernox(:,1);
A=interp1(x,y,(T25(:,11)),'linear');
B=interp1(x,y,(T26(:,11)),'linear');
C=interp1(x,y,(T30(:,11)),'linear');
D=interp1(x,y,(T31(:,11)),'linear');
E=interp1(x,y,(T32(:,11)),'linear');
F=interp1(x,y,(T33(:,11)),'linear');
T=interp1(x,y,(T2_4(:,11)),'linear');
U=interp1(x,y,(T2_5(:,11)),'linear');
o=[11];
T25(:,o)=[];
T26(:,o)=[];
T30(:,o)=[];
T31(:,o)=[];
T32(:,o)=[];
T33(:,o)=[];
T2_4(:,11)=[];
T2_5(:,11)=[];
g=input('Hvilke termoelement vil du se på?'); % Input for valg av termoelement
t=input('Hvilken spenning vil du se på? (angi en verdi mellom -626E-6 og -500E-6)');
plot(T25(:,g),A,'-'); %Plotter resultatene fra testen
xlabel('Spenning fra termoelement med 77K referanse');
ylabel('Grader [K]');
title('Plot av resultater fra termoelement 1');
axis([-650E-6 -450E-6 15 40]); %Angir verdier på aksene
hold on;
plot(T26(:,g),B,'--');
Hold on;
plot(T30(:,g),C,'-');
Hold on;
plot(T31(:,g),D,'--');
Hold on;
plot(T32(:,g),E,'-');
Hold on;
plot(T33(:,g),F,'--');
Hold on;
plot(T2_4(:,g),T,'-o');
Hold on;
plot(T2_5(:,g),U,'-^');
Hold on;
plot(ref77(:,1),ref77(:,2),'+');
hold on;
grid
```

```
%Laster inn Cernox
kalibreringstabellen
%Laster inn resultatene fra testene
```

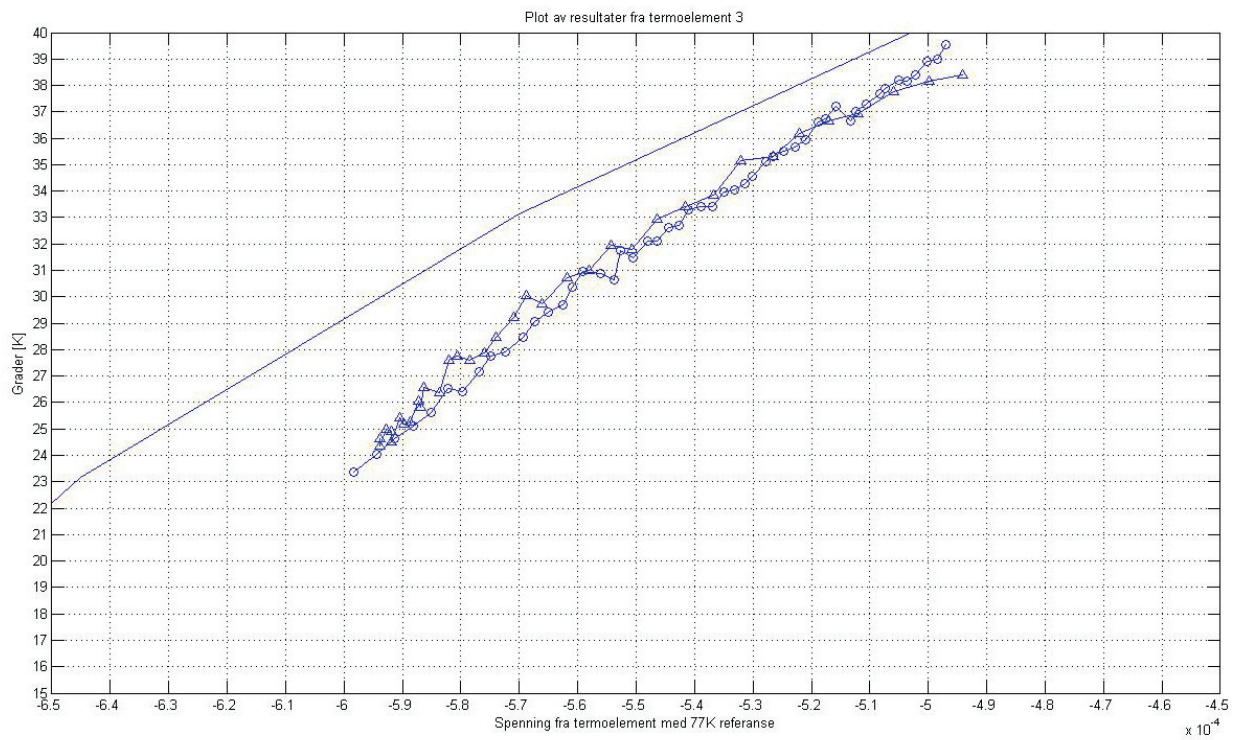
```
%Laster inn referansen til
termoelementene referert 77K
%Setter komma på rett desimalplass
(kommaplassering ble endret for å
lette overgangen mellom EXCEL og
MATLAB)
```

```
%Setter x til resistansen på Cernox
%Setter y til grader k. på Cernox
```

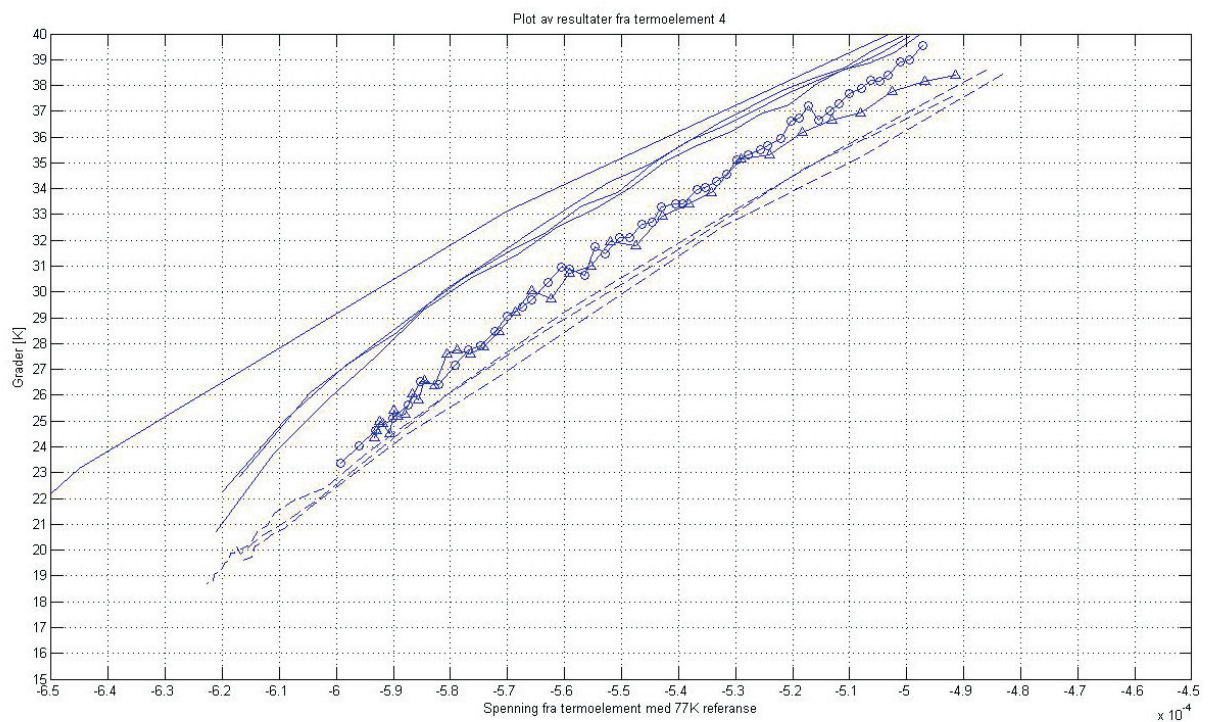
```
%Interpolerer cernox motstanden fra
testene med kalibrert Cernox
motstand med linear interpolasjon (kolonne 11 er
motstanden til Cernox sensoren)
```

```
%Fjerner cernoxresultatene fra
termoelementresultatene
```

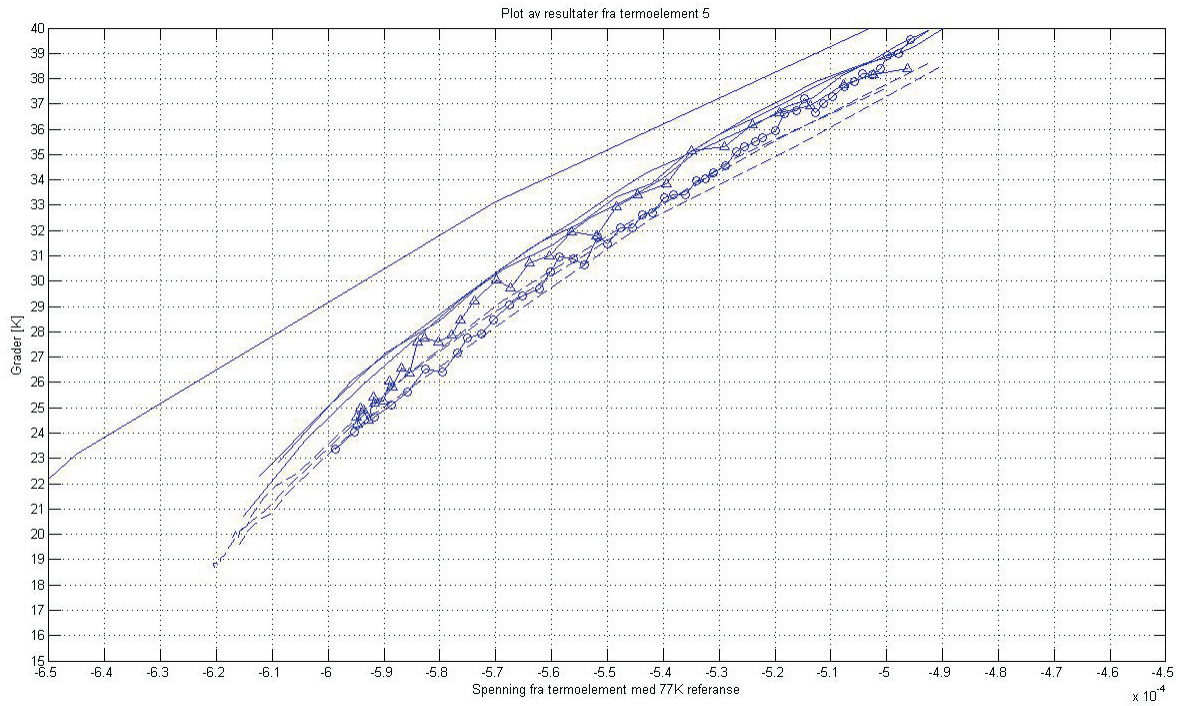
## Vedlegg 4 Resultater fra kalibreringstest 1 og 2.



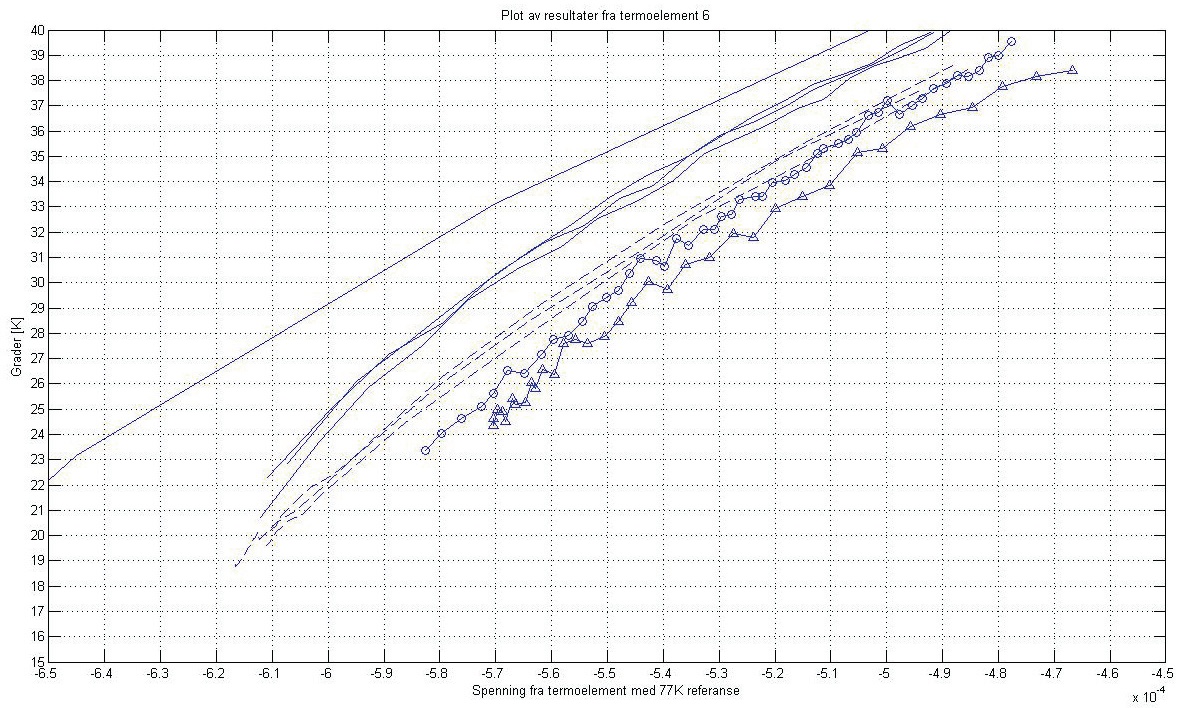
Figur V- 6 Resultater fra termoelement 3



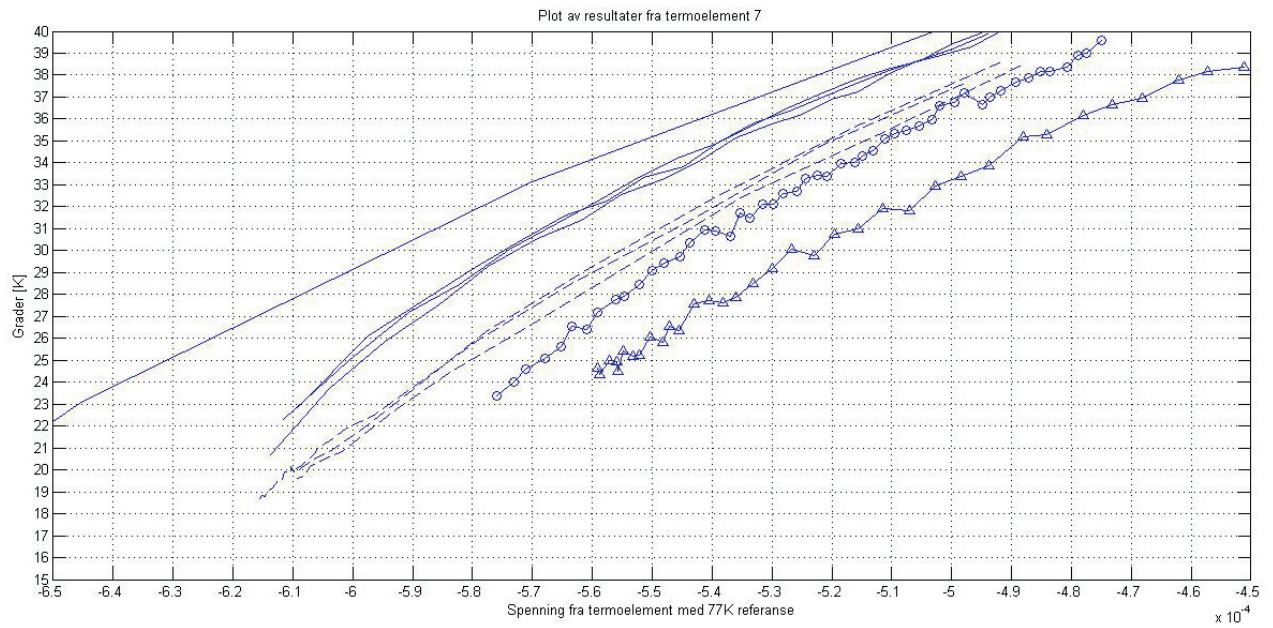
Figur V- 7 Resultater fra termoelement 4



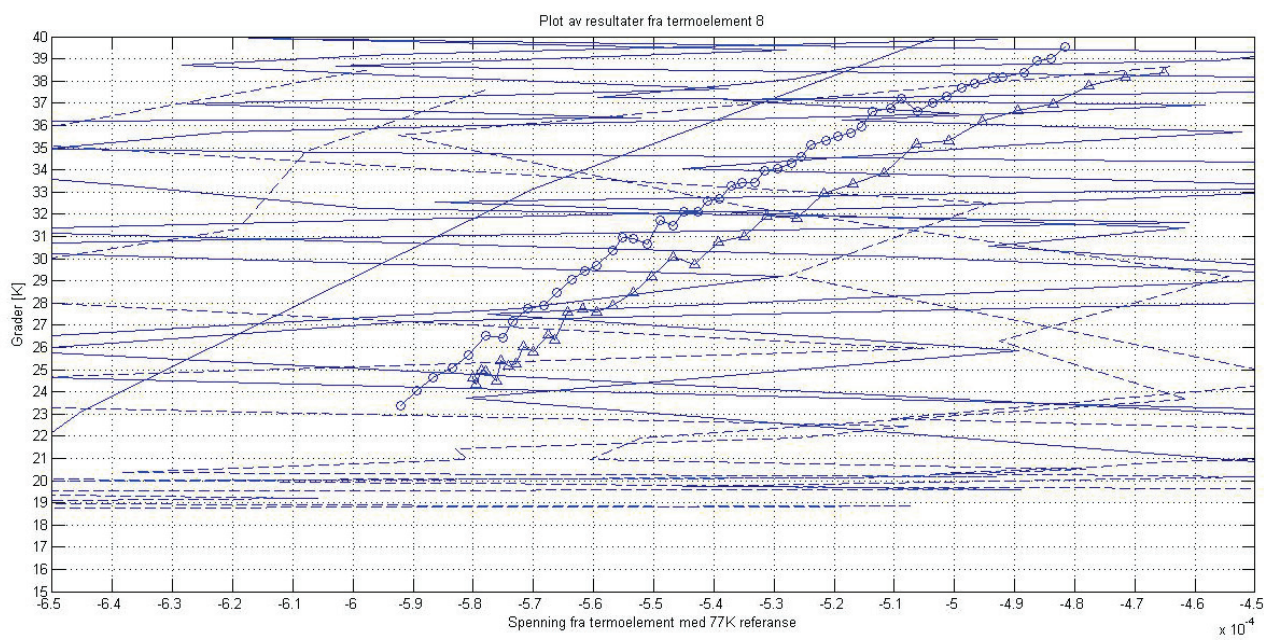
**Figur V- 8 Resultater fra termoelement 5**



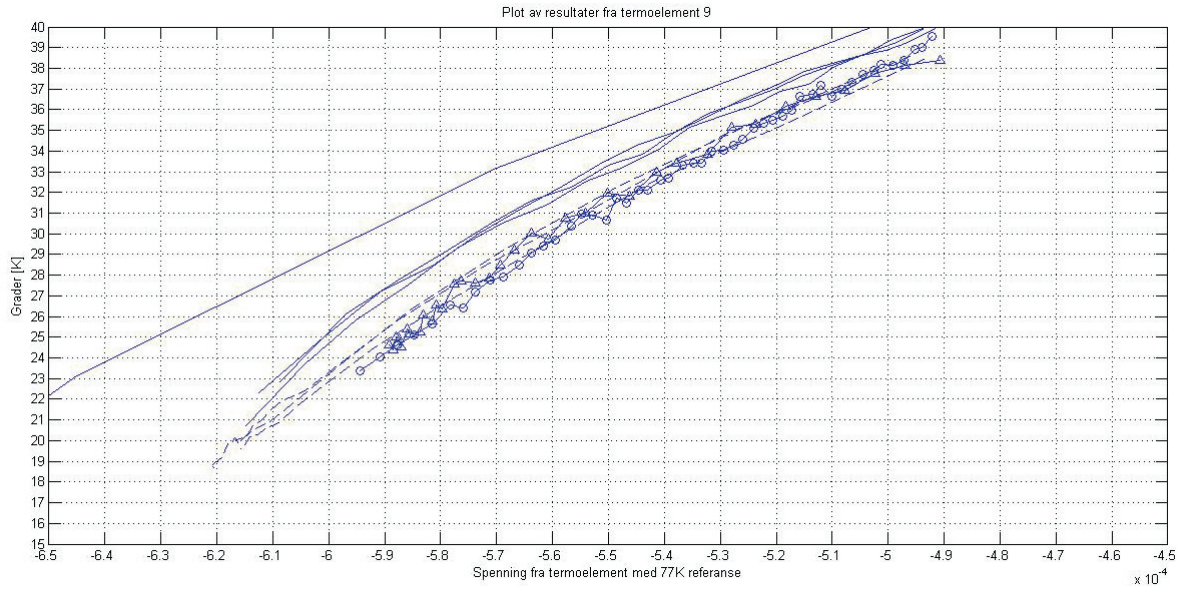
**Figur V- 9 Resultater fra termoelement 6**



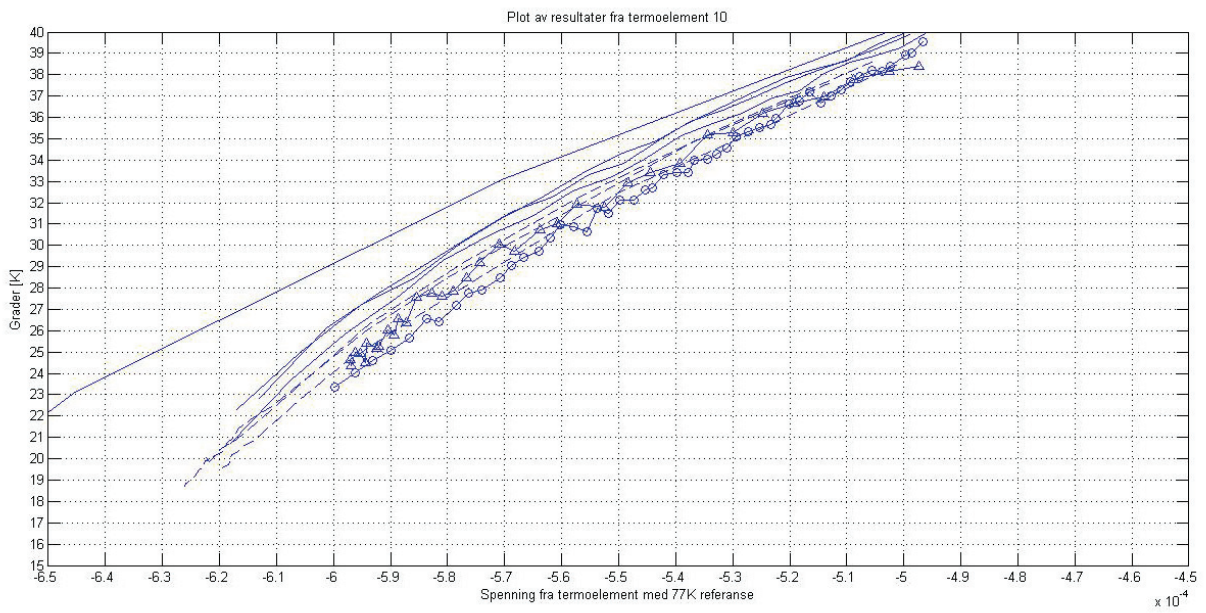
**Figur V- 10 Resultater fra termoelement 7**



**Figur V- 11 Resultater fra termoelement 8**



**Figur V- 12 Resultater fra termoelement 9**



**Figur V- 13 Resultater fra termoelement 10**

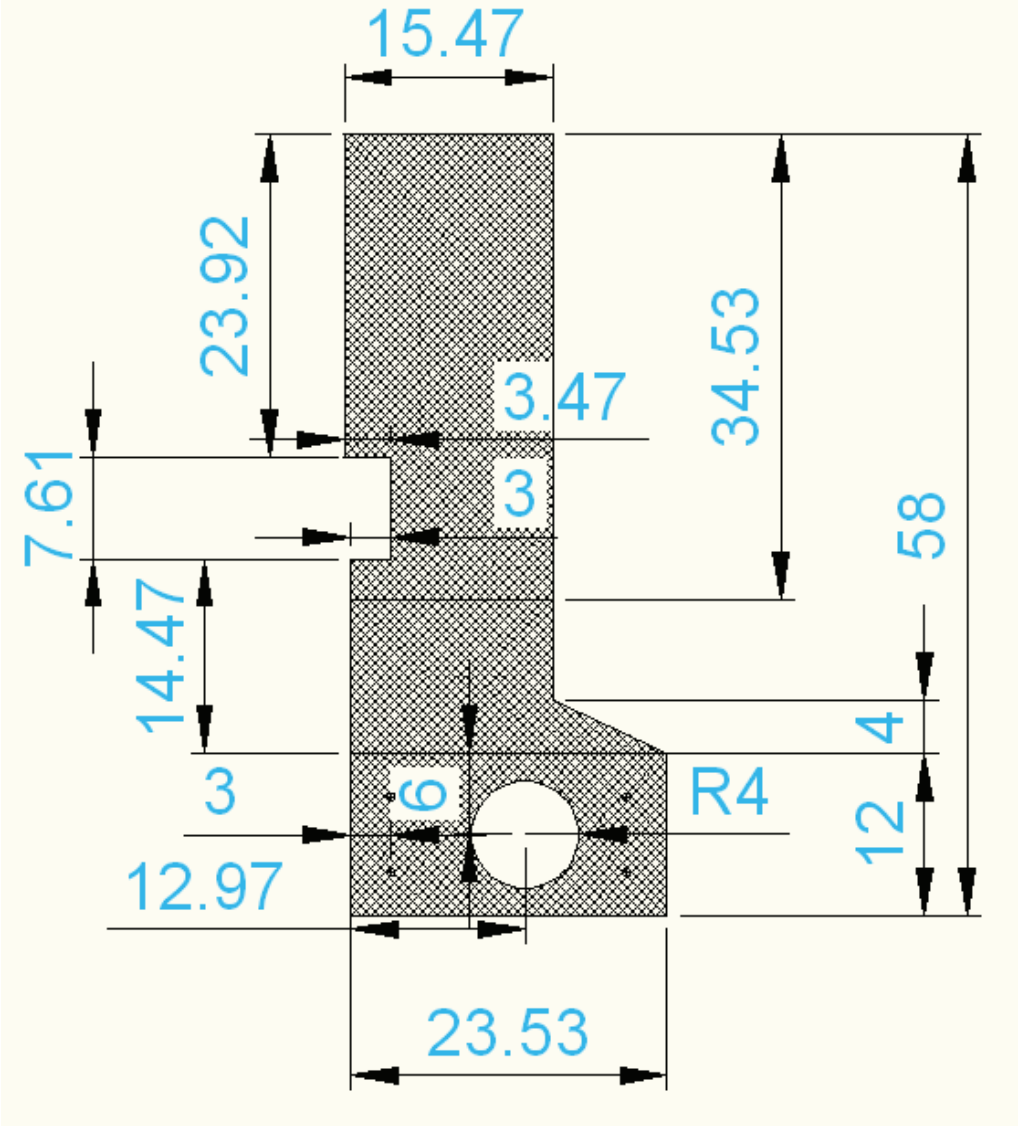
## Vedlegg 5 Utregning av varmeledning

(tabell hentet fra (23))

	A	B	C	D	E	F	G
1	Tabell over varmeledning kobber:						
2	Grader [K]	k [W/m*K] (Varmeledning)		Data for lederne	Termoelement	Spenningsmålingsledere	
3	1	4220		Diameter [m]	0,0002	0,0005	
4	2	8400		Areal leder [kvm]	3,14E-08	0,0000001963	
5	3	12500		Lengde leder [m]	5,5	2	
6	4	16200		Antall ledere	10	38	
7	5	19500		Temperaturforskjell Tc til th	20K-->80K	20K-->300K	
8	6	22200		Integrasjonsvariabel H	(80-20)/6	(100-20)/8 og (300-100)/5	
9	7	23900		Resultat integrasjon G [W/m]	150245	228100	
10	8	24800		Varmeledning per leder [W]	0,000857762	0,022382313	
11	9	24900		Varmeledning alle lederne [W]	0,008577624	0,850527875	
12	10	24300		Samlet tilført effekt [mW]	859		
13	15	17100					
14	20	10800					
15	30	4450					
16	40	2170					
17	50	1250					
18	60	829					
19	70	647					
20	80	557					
21	90	508					
22	100	482					
23	150	429					
24	200	413					
25	250	406					
26	300	401					
27	350	396					
28	400	393					
29	500	386					
30	600	379					
31	800	366					
				Utregninger:			
				Formel: $H = \frac{dQ}{dt} = k \cdot A \cdot \frac{T_H - T_c}{L}$			
				Integrasjonen ble gjort fra Tc til Th mhp k			
				For termoelementer: $G = (B14+2*B15+2*B16+2*B17+2*B18+2*B19+B20)*10/2$			
				For spenningsledere: $G = (B15+B16+B17+B18+B19+B20+B21+0,5*(B22+B14))*10+(B23+B24+B25+0,5*(B22+B26))*40$			
				Det ble antatt en temperatur på 20K ved målepunktet			

# Vedlegg 6 Kjøleledel for kjøling av skjøter

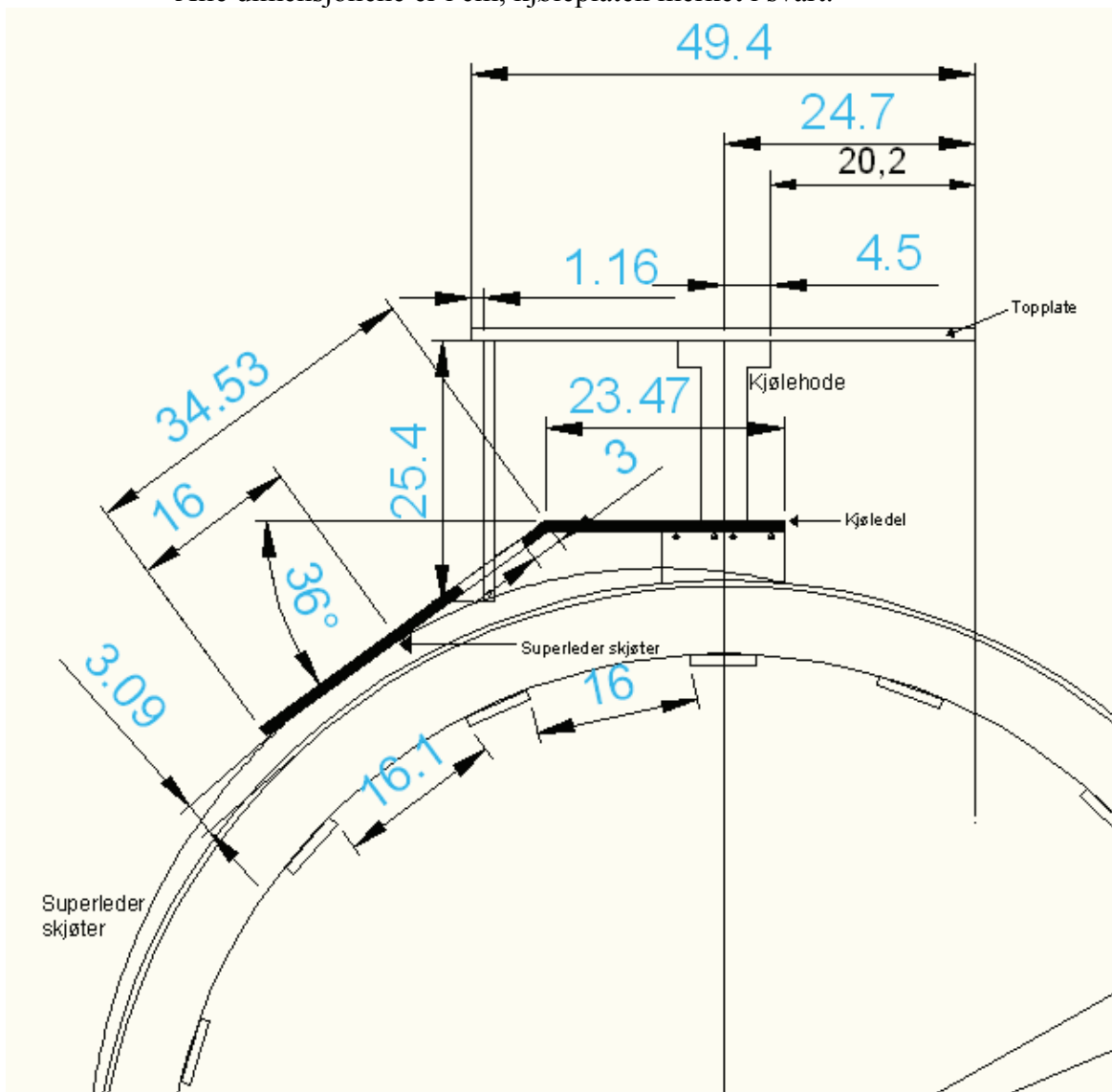
(alle mål i cm)



Figur V- 14 Skjøtekjøleledel

## Vedlegg 7 Kjøleplate påmontert kryostat.

Alle dimensjonene er i cm, kjøleplaten merket i svart.



Figur V- 15 Kjøledelens plassering på spolen ( bilde tatt sett mot fremsiden av spolen)



## Vedlegg 8 Lederkoder på spenningsystemet

Markeringene på kobberlederen angir også plasseringen på målepunktene. Plassering 1 er målepunktene som ligger nærmest toppen på spolen, mens plassering 2 er målepunktene som ligger nedenfor skjøtene (lengst fra kjølehode).

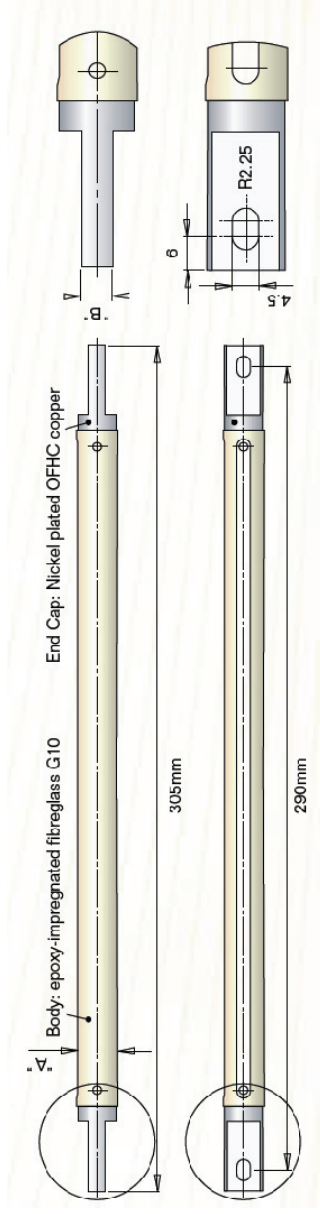
Tabell V- 2 Oversikt over hele spenningsmålingsystemet

Plassering/funksjon	Merket kobber leder	Merket rekkelemmer	Nummer d-sub	Fargekode isolert leder i kryostat	D-sub nummer	Fargekode leder utenfor kryostat	Kanal	Multiplerer kort
cernox strøm +	CX st +	1	1	Svart	1	hvit	-	G05-0139
cernox strøm -	CX st -	2	2	Hvit	1	svart	-	G05-0139
carenox spenning +	CX sp +	3	3	Brun	1	hvit	1H	G05-0139
cernox spenning -	CX sp -	4	4	Rød	1	grå	1L	G05-0139
Spenning bolt - spole - spole	B-0	5	5	Fiolett	1	orange	3H	G05-0139
Spenning bolt-spole - pinne	B-1	6	6	Blå	1	grå	3L	G05-0139
Pannekake 1			5				4H	G05-0139
Pannekake 1			8				4L	G05-0139
Spenning skjøt 1, plassering 2	1-2	7	7	Gul	1	orange	5H	G05-0139
spenning skjøt 1, plassering 1	1-1	8	8	Grønn	1	brun	5L	G05-0139
Pannekake 2			7				6L	G05-0139
Pannekake 2			10				6H	G05-0139
Spenning skjøt 2, plassering 2	2-2	9	9	Rosa	1	hvit	7H	G05-0139
spenning skjøt 2, plassering 1	2-1	10	10	Lyseblå	1	grønn	7L	G05-0139
Pannekake 3			9				8H	G05-0139
Pannekake 3			12				8L	G05-0139
Spenning skjøt 3, plassering 2	3-2	11	11	Brun med grønn markering	1	brun	9H	G05-0139
spenning skjøt 3, plassering 1	3-1	12	12	Hvit med grønn markering	1	grønn	9L	G05-0139
Pannekake 4			11				10H	G05-0139
Pannekake 4			14				10L	G05-0139

Spenning skjøt 4, plassering 2	4-2	13	13	Rød med blå markering	1	orange	11H	G05-0139
spenning skjøt 4, plassering 1	4-1	14	14	Hvit med gul markering	1	grønn	11L	G05-0139
Pannekake 5			13				12H	G05-0139
Pannekake 5			16				12L	G05-0139
Spenning skjøt 5, plassering 2	5-2	15	15	Gul med brun markering	1	hvit	13H	G05-0139
spenning skjøt 5, plassering 1	5-1	16	16	Lyseblå med brun markering	1	orange	13L	G05-0139
Pannekake 6			15				14H	G05-0139
Pannekake 6			18				14L	G05-0139
Spenning skjøt 6, plassering 2	6-2	17	17	Hvit med grå markering	1	blå	15H	G05-0139
spenning skjøt 6, plassering 1	6-1	18	18	Hvit med rosa markering	1	grå	15L	G05-0139
Pannekake 7			17				16H	G05-0139
Pannekake 7			20				16L	G05-0139
Spenning skjøt 7, plassering 2	7-2	19	19	Rosa med brun markering	1	brun	17H	G05-0139
spenning skjøt 7, plassering 1	7-1	20	20	Hvit med blå markering	1	sort	17L	G05-0139
Pannekake 8			19				18H	G05-0139
Pannekake 8			22				18L	G05-0139
Spenning skjøt 8, plassering 2	8-2	21	21	Brun med blå markering	1	grønn	19H	G05-0139
spenning skjøt 8, plassering 1	8-1	22	22	Hvit med rød markering	1	grå	19L	G05-0139
Pannekake 9			21				20H	G05-0139
Pannekake 9			24				20L	G05-0139
Spenning skjøt 9, plassering 2	9-2	23	23	Brun med rød markering	1	brun	1H	G05-0156
spenning skjøt 9, plassering 1	9-1	24	24	Hvit med svart markering	1	blå	1L	G05-0156
Pannekake 10			23				2H	G05-0156
Pannekake 10			1				2L	G05-0156
Spenning skjøt 10, plassering 2	10-2	25	25	Lyseblå med rosa markering	1	grå	3H	G05-0156
spenning skjøt 10, plassering 1	10-1	26	1	Svart	2	brun	3L	G05-0156
Pannekake 11			25				4H	G05-0156
Pannekake 11			3				4L	G05-0156

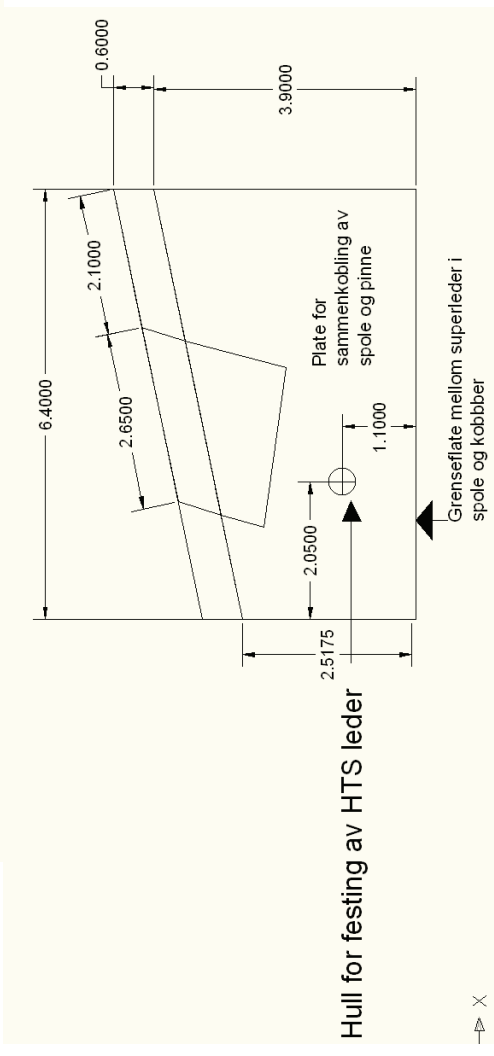
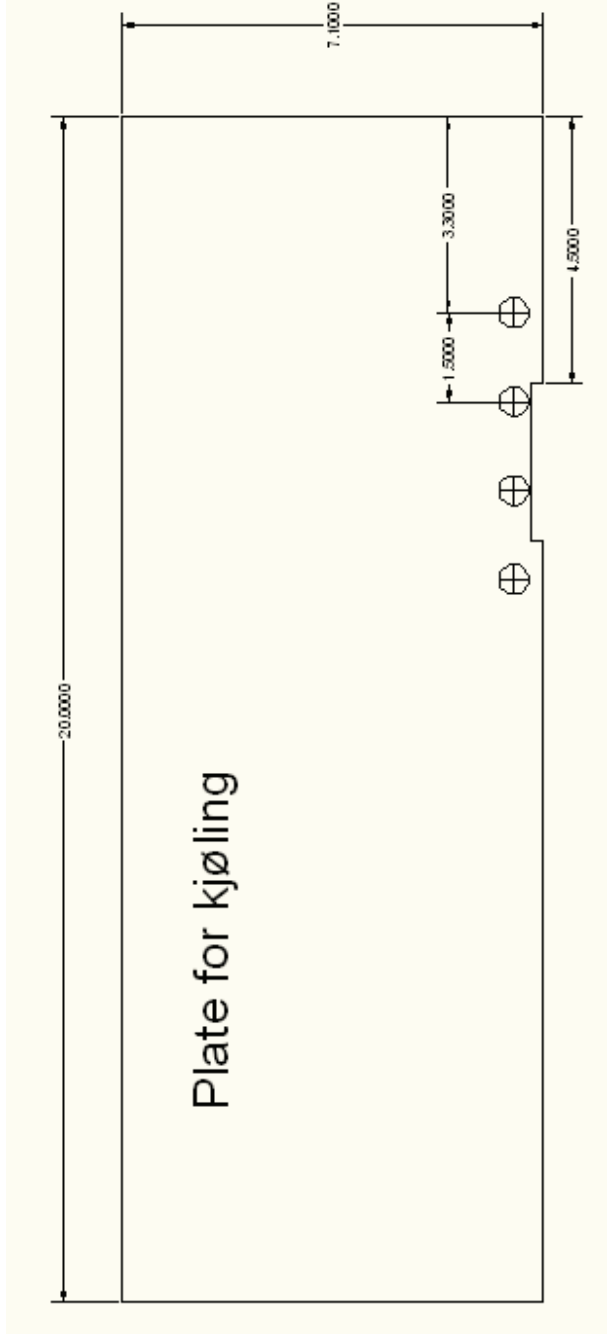
Spenning skjøt 11, plassering 2	11-2	27	2	Hvit	2	2	5H	G05-0156
spenning skjøt 11, plassering 1	11-1	28	3	Brun	2	5L	5L	G05-0156
Pannekake 12			2			6H	6H	G05-0156
Pannekake 12			5			6L	6L	G05-0156
Spenning skjøt 12, plassering 2	12-2	29	4	Rød	2	7H	7H	G05-0156
spenning skjøt 12, plassering 1	12-1	30	5	Fiolett	2	7L	7L	G05-0156
Pannekake 13			4			8H	8H	G05-0156
Pannekake 13			7			8L	8L	G05-0156
Spenning skjøt 13, plassering 2	13-2	31	6	Blå	2	9H	9H	G05-0156
spenning skjøt 13, plassering 1	13-1	32	7	Gul	2	9L	9L	G05-0156
Pannekake 14			6			10H	10H	G05-0156
Pannekake 14			9			10L	10L	G05-0156
Spenning skjøt 14, plassering 2	14-2	33	8	Grønn	2	11H	11H	G05-0156
spenning skjøt 14, plassering 1	14-1	34	9	Rosa	2	11L	11L	G05-0156
Pannekake 15			8			12H	12H	G05-0156
Pannekake 15			11			12L	12L	G05-0156
Spenning skjøt 15, plassering 2	15-2	35	10	Lyseblå	2	13H	13H	G05-0156
spenning skjøt 15, plassering 1	15-1	36	11	Brun med grønn markering	2	13L	13L	G05-0156
Pannekake 16			10			14H	14H	G05-0156
Pannekake 16			13			14L	14L	G05-0156
Spenning ytter-spole - pinne	y-1	37	12	Hvit med grønn markering	2	15H	15H	G05-0156
Spenning ytter-spole - spole	y-0	38	13	Rød med blå markering	2	15L	15L	G05-0156
Sp. Måling hele spolen			5			16H	16H	G05-0156
Sp. Måling hele spolen			13			16L	16L	G05-0156
Stav - terminal - bakside på stav			12			17H	17H	G05-0156
Stav - terminal - bakside på terminal			-			17L	17L	G05-0156
Stav - terminal - fremside på stav			6			18H	18H	G05-0156
stav - terminal - fremside på terminal			-			18L	18L	G05-0156

## Vedlegg 9 Tegning av HTS-110 leder



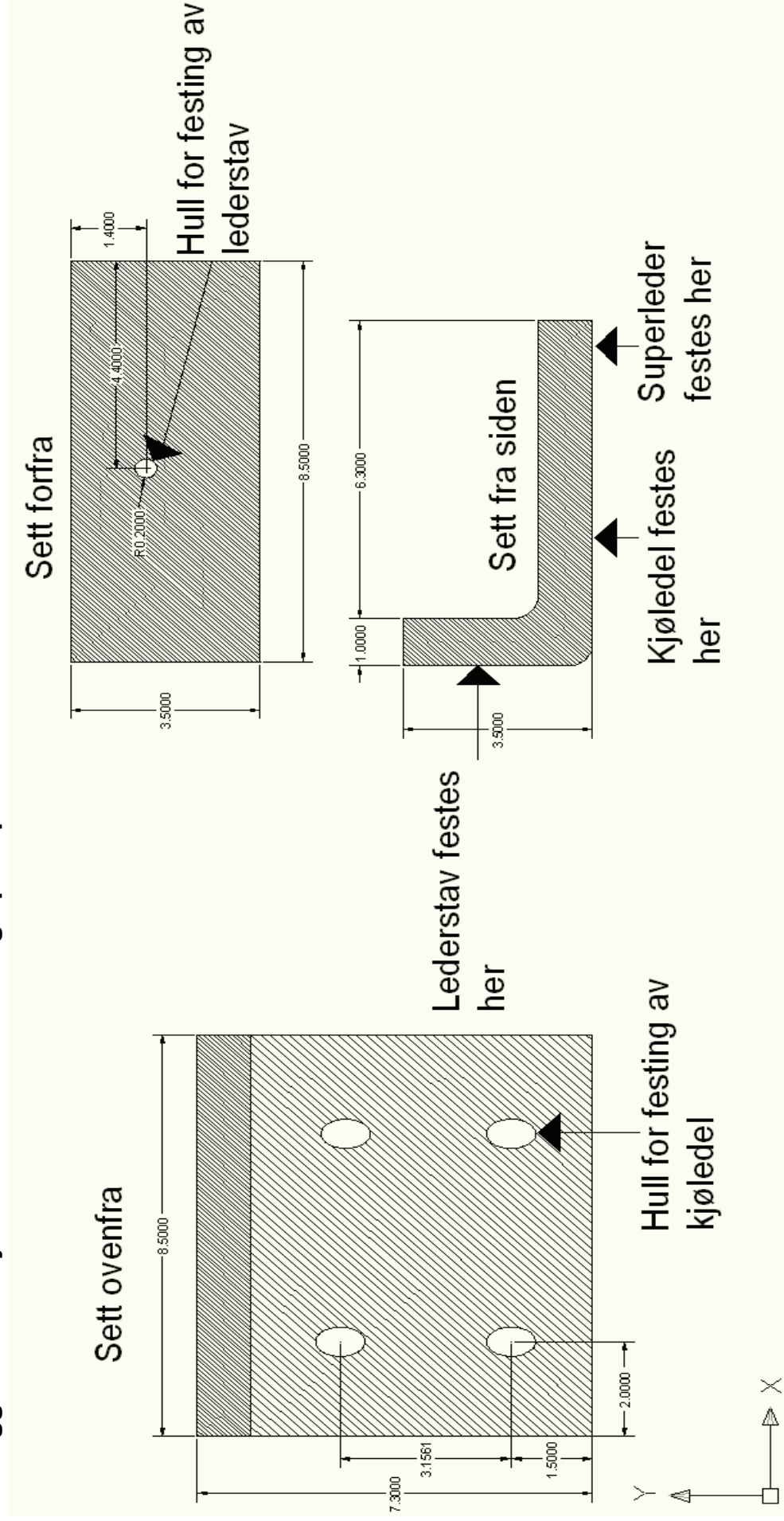
Figur V- 16 HTS leder (15)

**Vedlegg 10 Deler for skjøtning av spole og HTS leder på fremsiden. (alle mål i cm)**



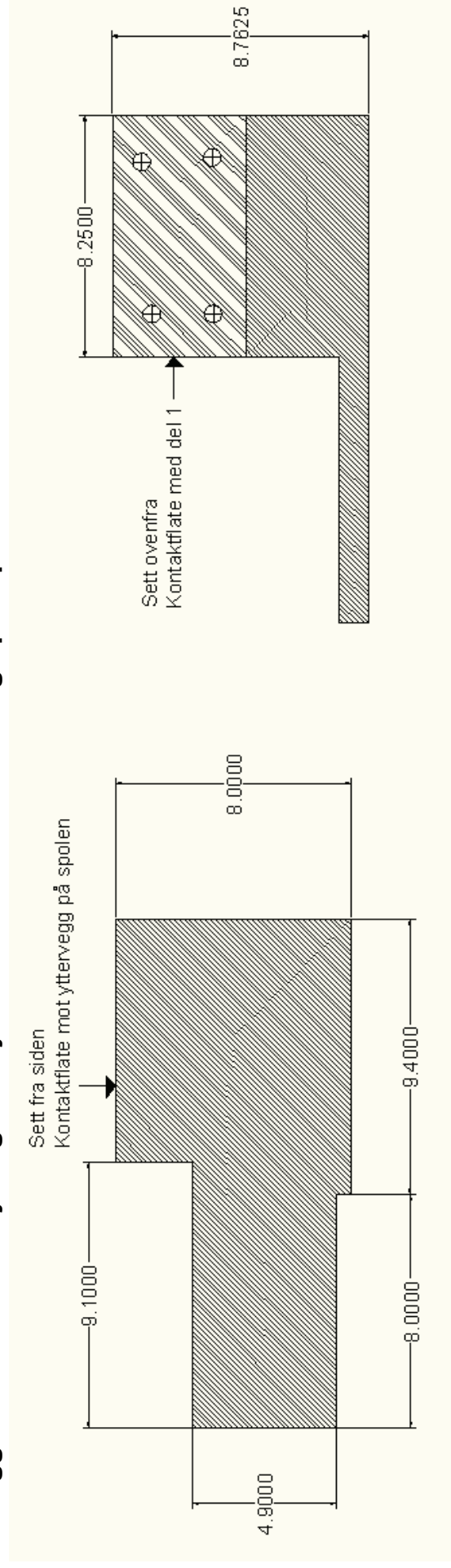
**Figur V- 17 Deler for å forbinde spolen og lederstaven på fremsiden**

## Vedlegg 11 Skjøt mellom lederstav og spole på baksiden



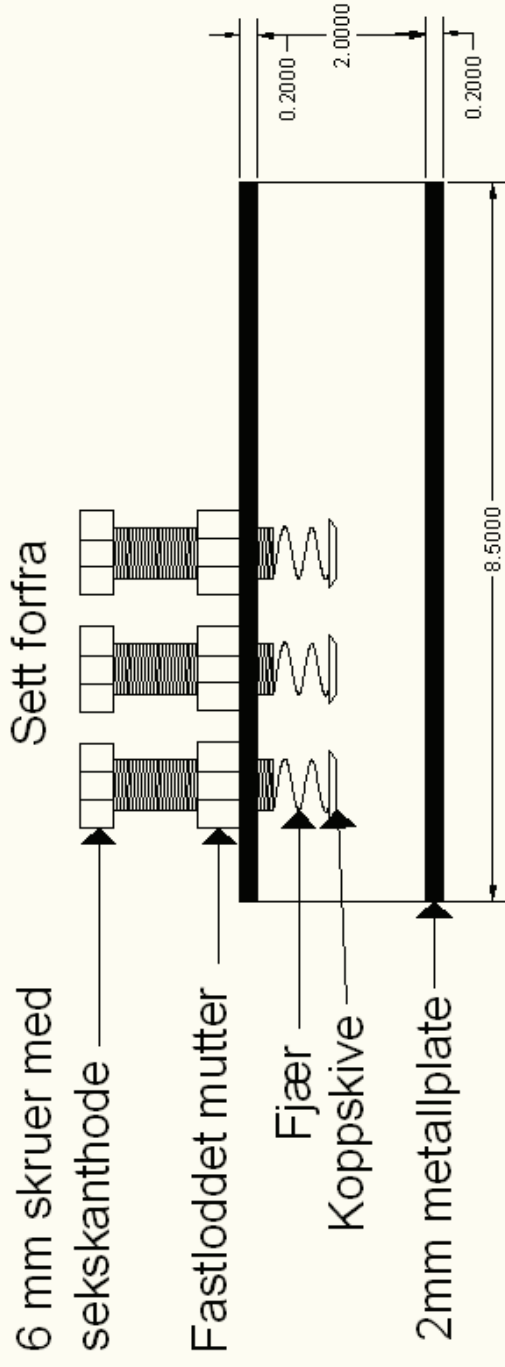
Figur V- 18 Del for å forbinde lederstaven og spolen på baksiden

## Vedlegg 12 Del for kjøling av skjøten mellom lederstav og spole på baksiden

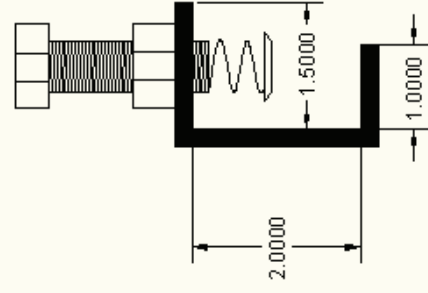


Figur V- 19 Del for kjøling av skjøt på baksiden

### Vedlegg 13 Fjærmekanisme for bruk på baksiden



Sett fra siden

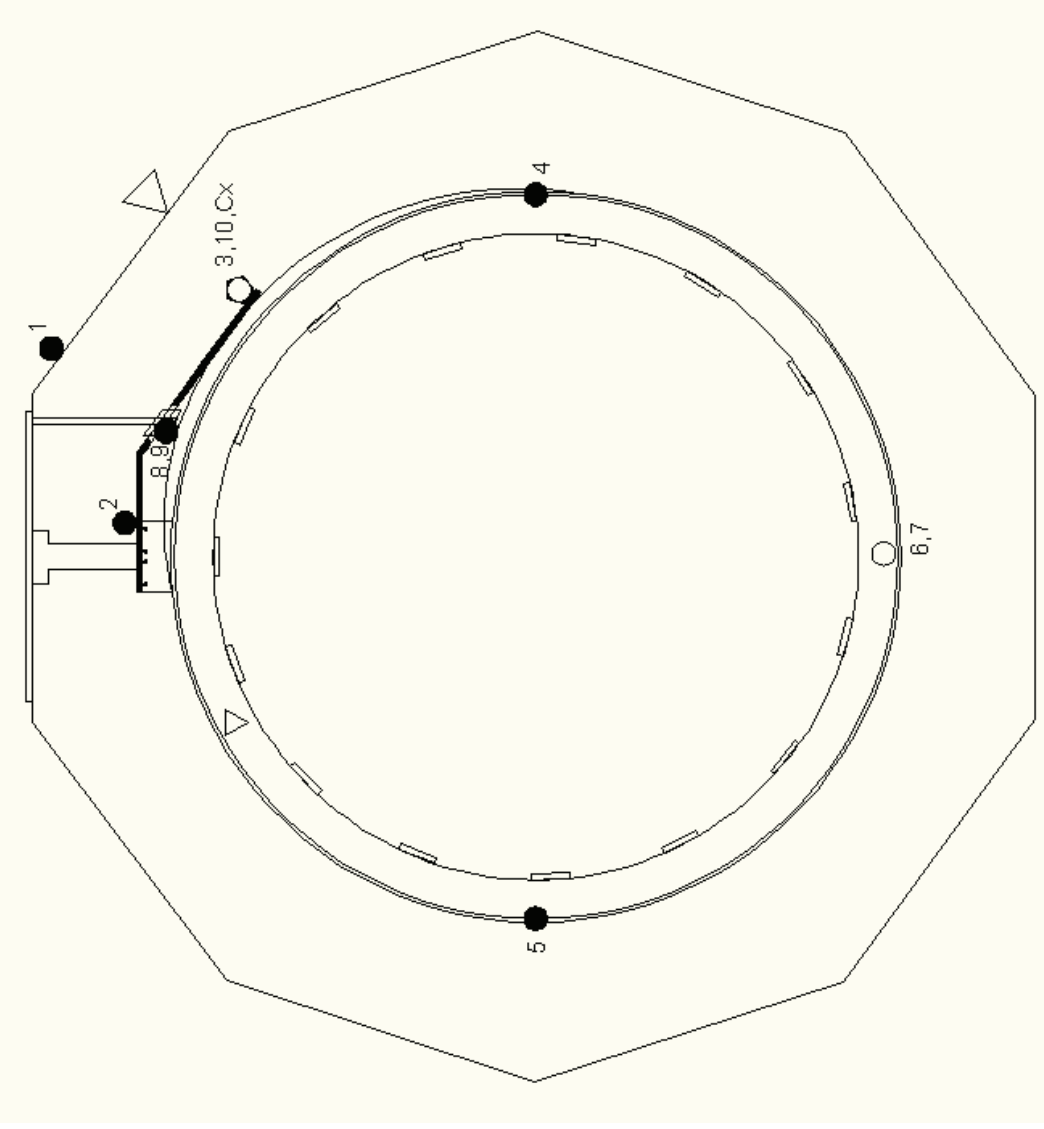


Figur V- 20 Fjærmekanism for lodding på baksiden



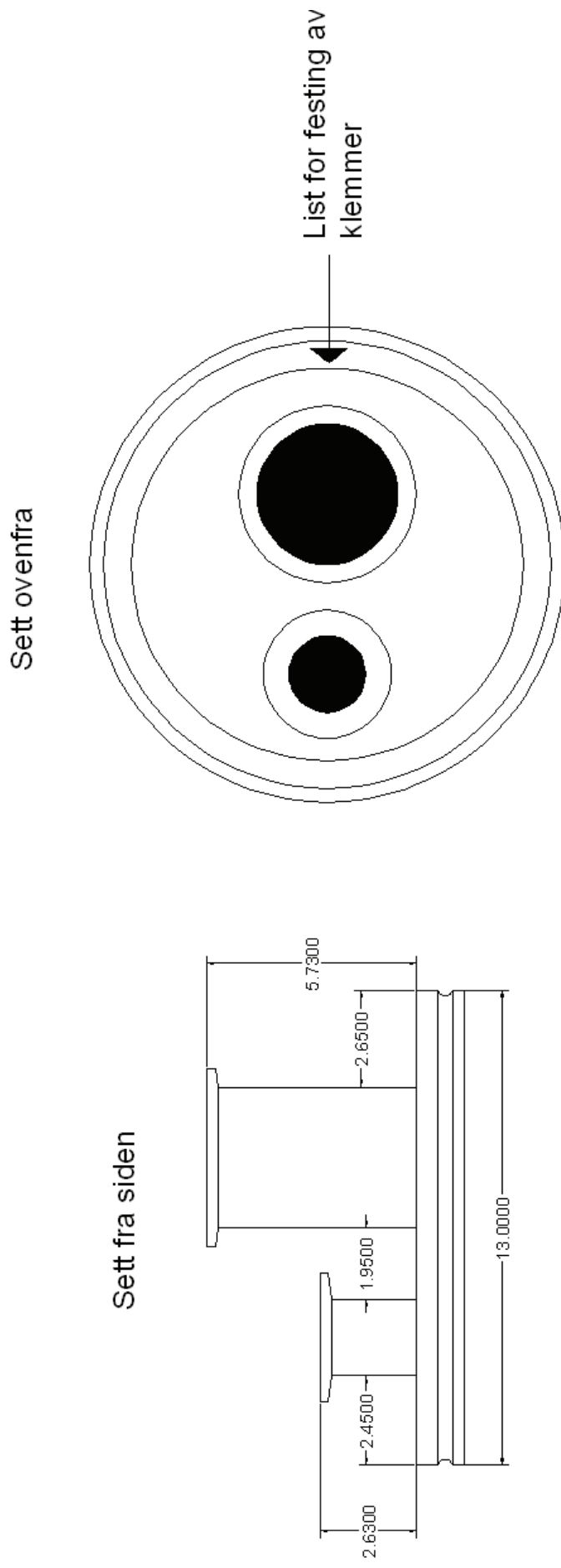
#### Vedlegg 14 Plassering av termoelementer, Cernox sensor og varmesluk.

Termoelementer er merket med fylt sirkel for enkelt elementer og tom sirkel for plasseringer med to tempepraturmålere. Varmesluk er merket med trekant, og cernox er merket med femkant. På tegningen er synsvinkelen mot baksiden på spolen.



Figur V- 21 Plassering av termoelementer

### Vedlegg 15 Tegning av gjennomføringsplate til termoelementene



Figur V- 22 Gjennomføringsplate til termoelementene

## Vedlegg 16 Instrumentliste

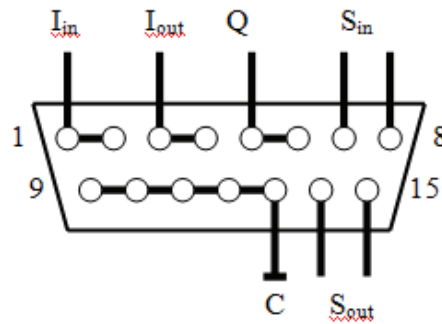
Tabell V- 3 Instrumentliste

Forsøk	Type	Funksjon	Merket	Bruk
Spolebygging	JBC ID 3110	Loddebolt	Umerket	Brukt under skjøting
Kalibreringstester	ALCATEL Vakuumpumpe	Vakuumpumpe	P05-0060	Vakuumpumpe for test kryostat
Kalibreringstester	LEYBOLD Coolpak 6000	Kompressor	P05-0058	Kompressor brukt under kalibreringsforsøk
Kalibreringstester	LEYBOLD CP140T	Kaldhode	P05-0058-01	Kaldhode brukt under kalibreringsforsøk
Kalibreringstester og hovedforsøk	AGILENT 34970A	Datalogger	G05-0171	Datalogger for samtlige forsøk
Kalibreringstester og hovedforsøk	KEITHLEY 2100	Multimeter	S03-0400	Strømmåling på Cernox
Kalibreringstester og hovedforsøk	KNICK Spannungsgeber	Spenningskilde	B02-0212	Strøm til Cernox
Kalibreringstester	GW GPR-30H10	Spenningskilde	B02-0356	Strøm varmelement kalibreringstest
Kalibreringstester og hovedforsøk	FLUKE 117	Multimeter	S03-0382	Brukt til feildetektering
Kalibreringstester	Motstand 2,2kohm	Motstand	K01-0336	Erstatning for Cernox under testing
Kalibreringstester	DELL Latitude D620	PC	Umerket	Datalogging
Hovedforsøk	DELL Latitude D505	PC	Umerket	Datalogging
Hovedforsøk	EDWARDS High Vaccum ltd. 2S50	Vakuumpumpe	Umerket	Forvakuum
Hovedforsøk	PEIFFER TPH200	Turbomolekylær vakuumpumpe	Umerket	Vakuumpumpe hovedforsøk
Hovedforsøk	PFIEFFER TCP200	Kontrollenhet turbomolekylær pumpe	Umerket	Strømforsyning og turtallskontroll på turbomolekylær pumpe
Hovedforsøk	BALZERS PKG 020	Trykkmanometer	EFI P01-0051	Trykk kryostat
Hovedforsøk	BALZERS TPG 031A	Trykkmanometer	Umerket	Trykk forvakuum
Hovedforsøk	SUMITOMO CSW- 71	Kompressor	Umerket	Kompressor
Hovedforsøk	SUMITOMO RDK- 408S	Kaldhode	Umerket	Kaldhode brukt under hovedforsøk
Hovedforsøk	SUMITOMO SRDK-408D2	Kryostat	Umerket	Kryostat brukt under hovedforsøk
Induktansmåling	Thandor TG501	Frekvensgenerator	B03-0172	AC strøm for induktansmåling
Feltmåling	F.W.Bell Model 5070	Gausmeter	N01-0016	Felt kryostat

## Vedlegg 17 Strømkilden

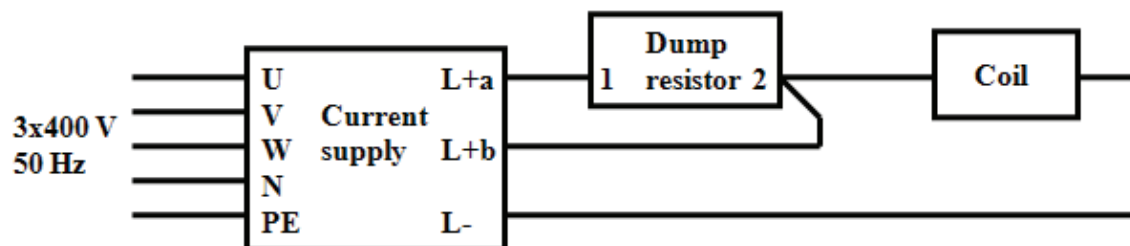
### Vedlegg 17.1 Pinn oversikt

Figur V- 23 viser oversikt over slik pinnene på d – sub kontaktens ble koblet til.  $I_{in}$ ,  $I_{out}$  og Q ble koblet mot C, mens pin 7 og 8 ble koblet til en bryter og  $S_{out}$  ble koblet til en diode.



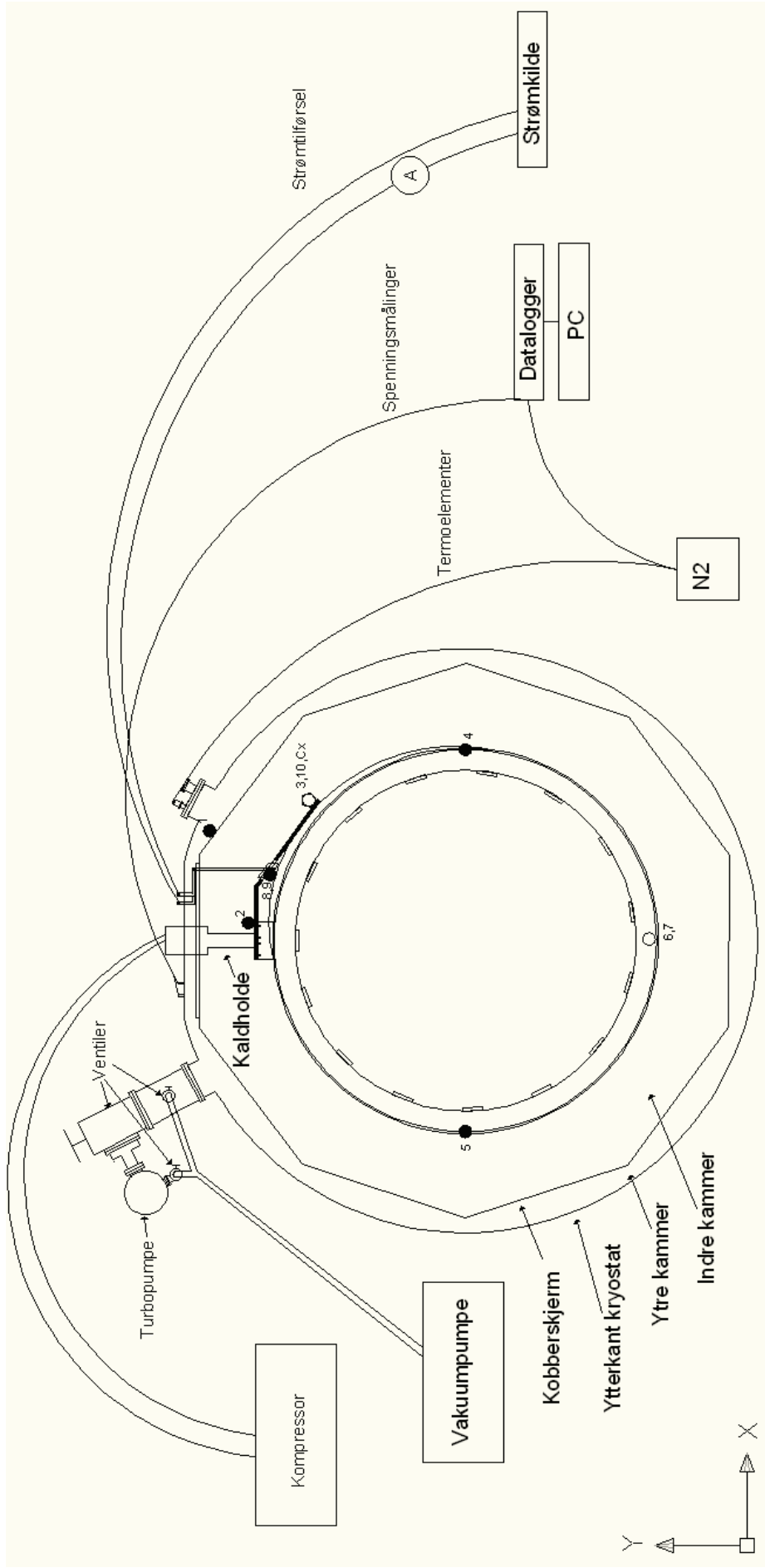
Figur V- 23 Pinnoversikt for strømstyring (19)

### Vedlegg 17.2 Koblingskjema for strømkilde og spolen



Figur V- 24 Koblingskjema for strømkilden og spolen (19)

# Vedlegg 18 Testoppsett

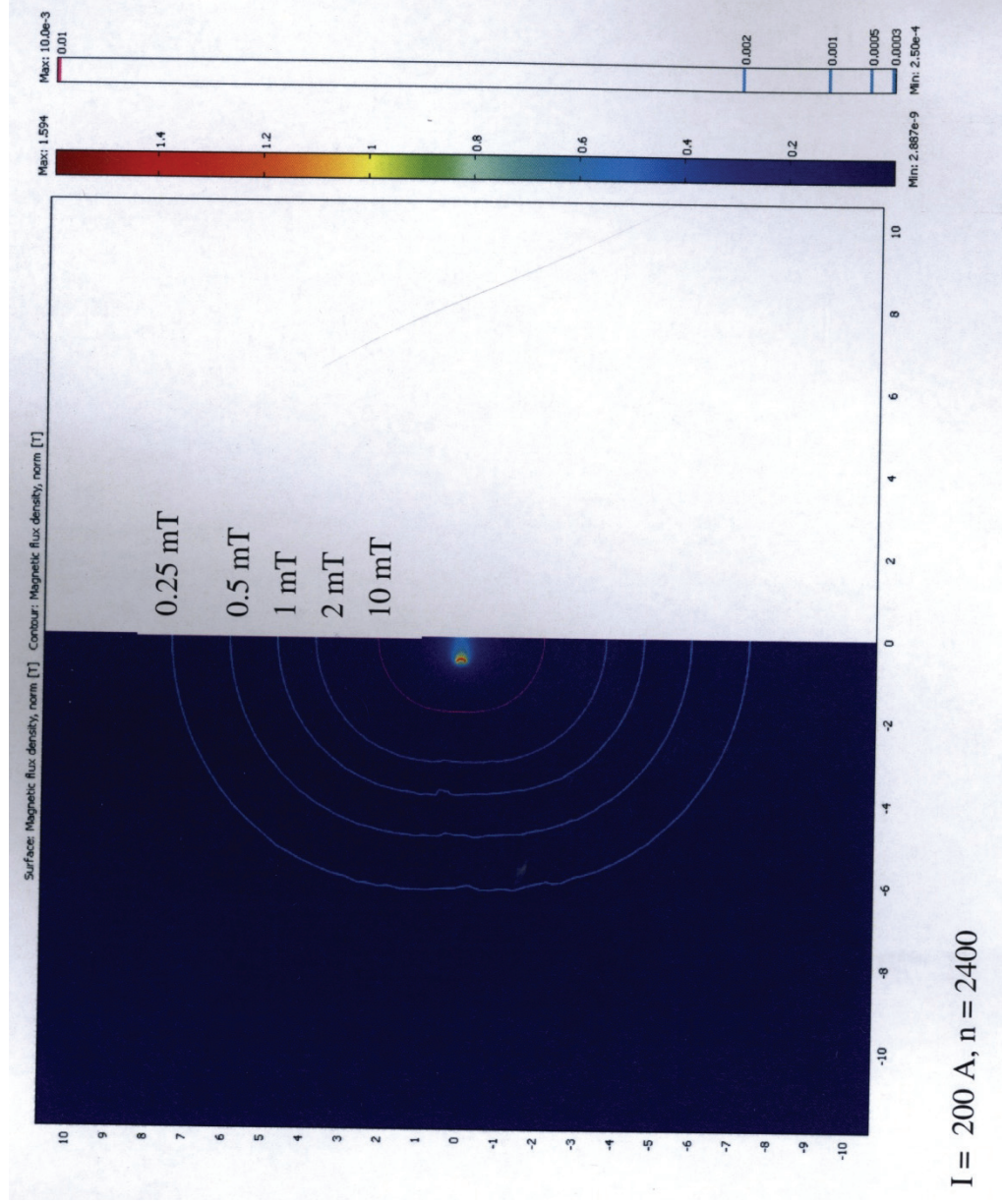


## Vedlegg 19    Matlab program for beregning av Cernox temperatur

```
clc
clear
cernox;
x=Cernox(:,2);
y=Cernox(:,1);
K=input('Hva er motstanden over Cernox sensoren?');
T=interp1(x,Y,K,'linear'); %interpolerer motstanden K med tabellen
```

# Vedlegg 20 Feltfordeling

Mottat fra Niklas Magnusson

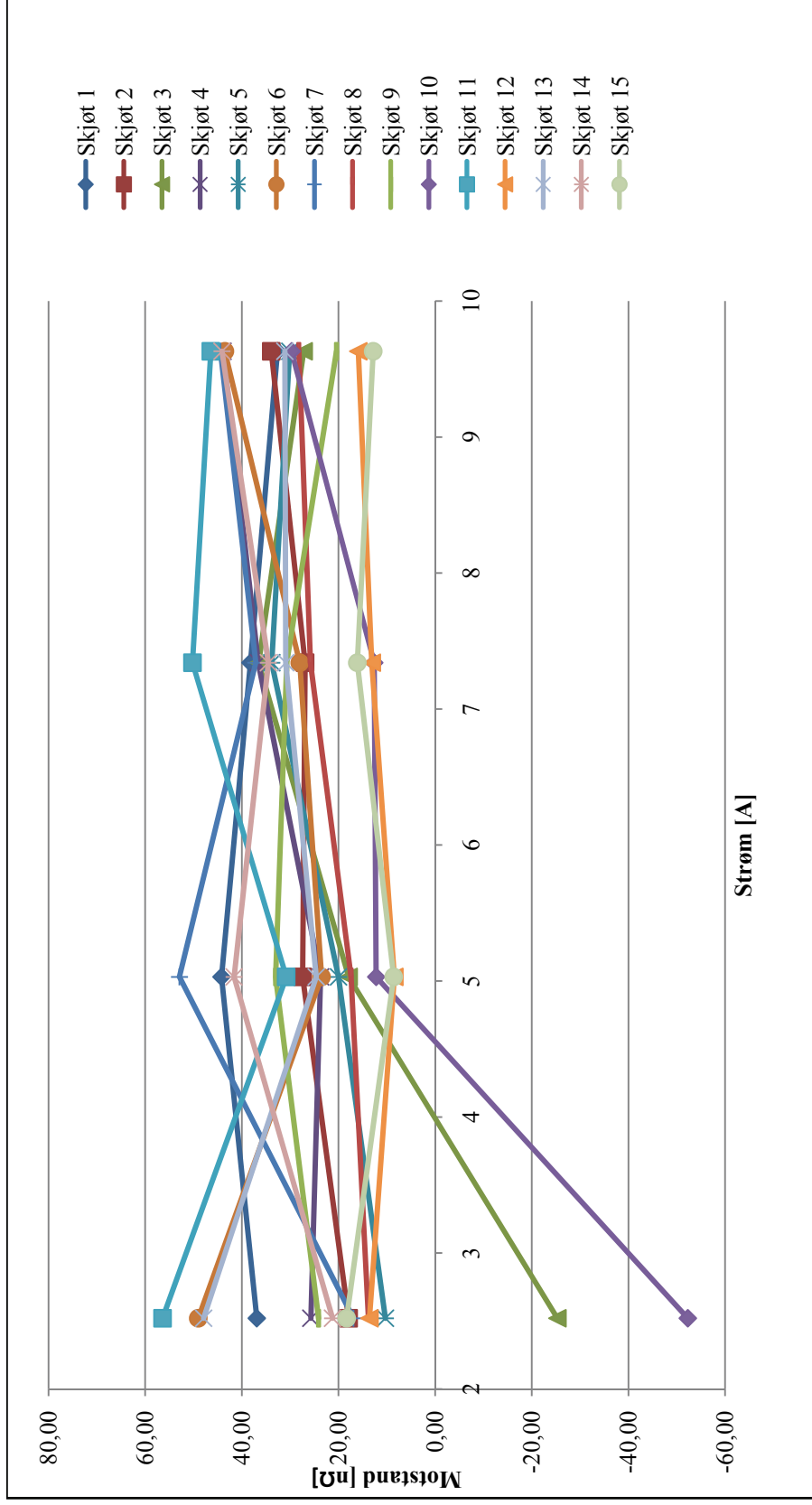


I = 200 A, n = 2400

Figur V- 25 Feltfordeling om spolen

## Vedlegg 21

### Motstanden over skjøtene gitt i nΩ



Figur V- 26 Motstanden over skjøtene ved forskjellige strømmåer



## Vedlegg 22      Matlab kode for plotting av temperaturer under kjølingen

```
clc
clear
ref77K_T;
T = xlsread('Nedkjøling');
ref77(:,1)=ref77(:,1)*(-1)
T(1,:)=[];
Tid=T(:,1);
Tid=Tid/60;
x=ref77(:,1);
y=ref77(:,2);
T1=interp1(x,y,T(:,2),'linear');
T2=interp1(x,y,T(:,3),'linear');
T3=interp1(x,y,T(:,4),'linear');
T4=interp1(x,y,T(:,5),'linear');
T5=interp1(x,y,T(:,6),'linear');
T6=interp1(x,y,T(:,7),'linear');
T7=interp1(x,y,T(:,8),'linear');
T8=interp1(x,y,T(:,9),'linear');
T9=interp1(x,y,T(:,10),'linear');
T10=interp1(x,y,T(:,11),'linear');
Talle(:,1)=T1;
matrise
Talle(:,2)=T2;
Talle(:,3)=T3;
Talle(:,4)=T4;
Talle(:,5)=T5;
Talle(:,6)=T6;
Talle(:,7)=T7;
Talle(:,8)=T8;
Talle(:,9)=T9;
Talle(:,10)=T10;
plot(Tid,Talle);
h = legend('Termoelement 1','Termoelement 2',
'Termoelement 3','Termoelement 4',
'Termoelement 5','Termoelement 6',
'Termoelement 7','Termoelement 8',
'Termoelement 9','Termoelement 10',1);
xlabel('Tid siden kompressor ble skrudd av [t]');
ylabel('Temperatur [K]');
title('Nedkjøling av kryostaten');
grid
```

*(Note: The original image contains several green comments on the right side of the code, which are not present in the provided text. I have included them here for accuracy based on the image content.)*

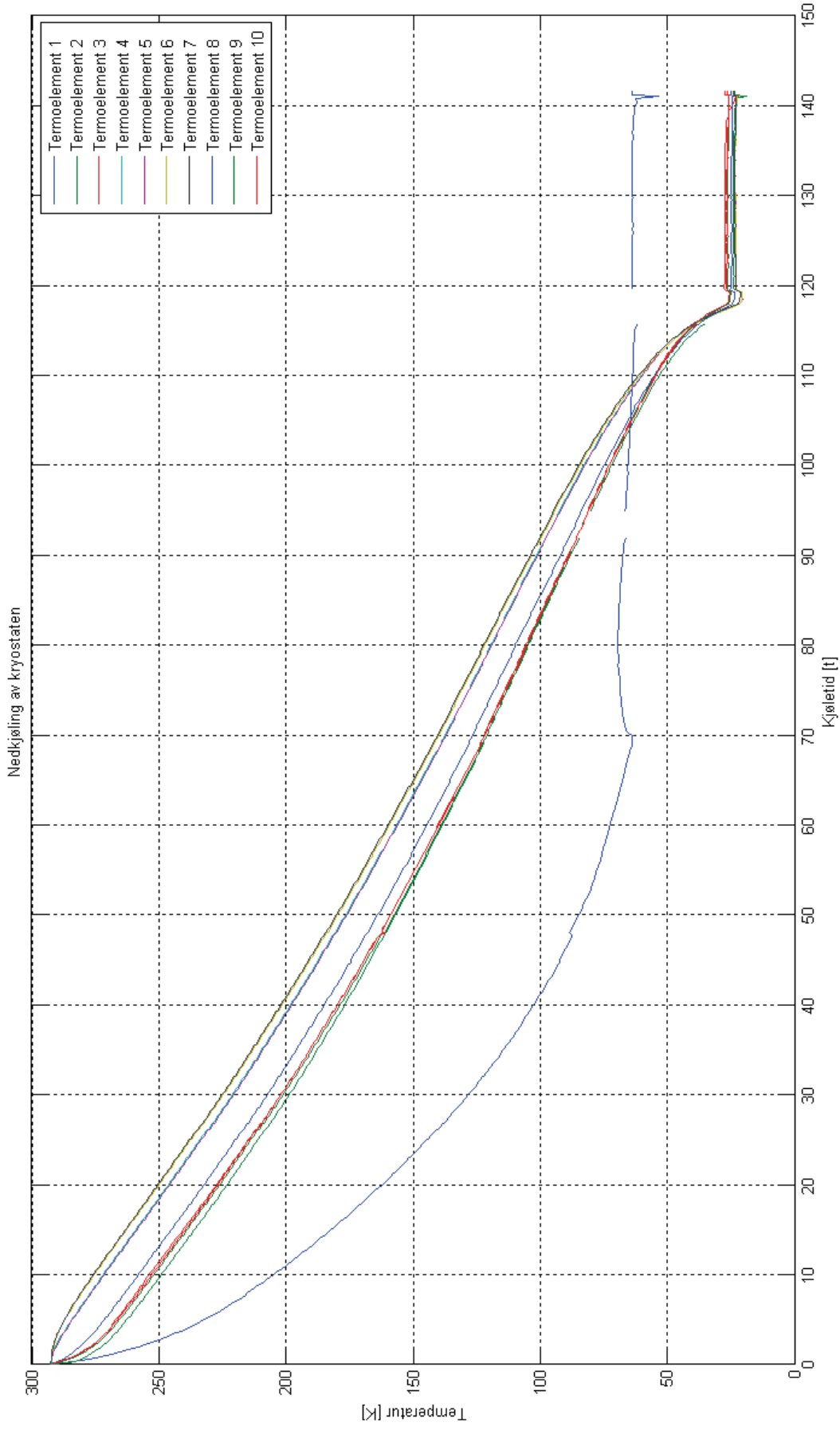
```
%Laster 77K referanse termoelement.
%Henter resultatene fra nedkjølingen

%Fjerner rad en (bare informasjon)
%Tid er kolonne en
%Minutter til timer
%x er temperaturer
%Y er spenninger på temoelementer
%Interpolerer termoelementenes
spenninger med referansen

%Setter resultatene i en felles
```

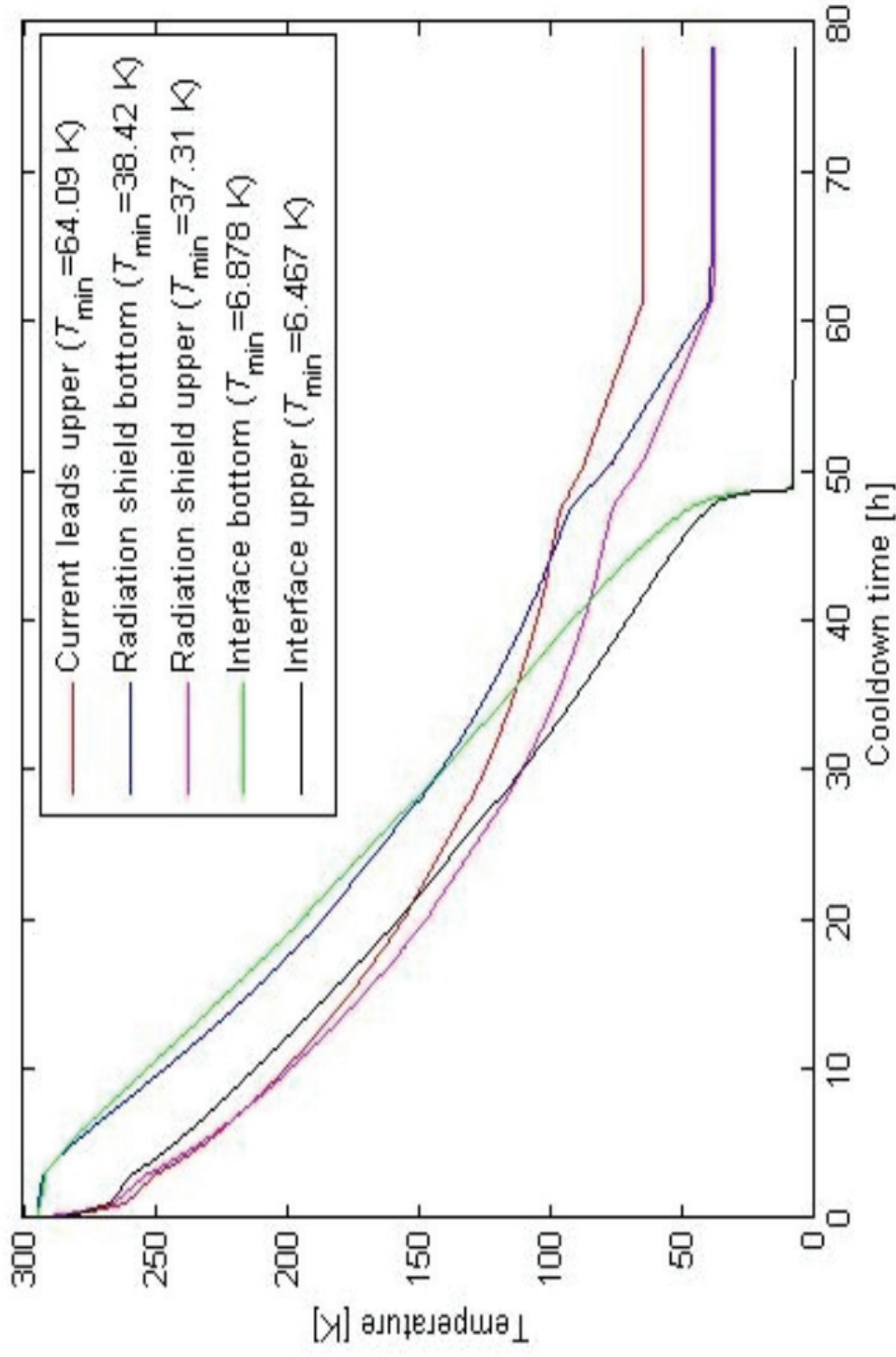
For oppvarmingen ble samme kode brukt, men dataene ble hentet fra et annet Excel ark.

### Vedlegg 23 Temperaturprofil på kryostatet under nedkjøling



Figur V- 27 Temperaturprofil nedkjøling

## Vedlegg 24 Temperaturprofil nedkjøling av kryostat uten montert spole



Figur V-28 Temperaturprofil nedkjøling av kryostat (24)

