



NTNU – Trondheim
Norwegian University of
Science and Technology

AC-tap i MgB₂-superleder

Effekt av simulert slaglende

Sandra Madeleine Lindau

Master of Science in Electric Power Engineering

Submission date: June 2013

Supervisor: Frank Mauseth, ELKRAFT

Co-supervisor: Niklas Magnusson, SINTEF Energi AS

Norwegian University of Science and Technology
Department of Electric Power Engineering

Oppgavebeskrivelse

Recently a new, inexpensive superconductor (MgB_2) has entered the market. Currently the conductor is used in DC applications, but the leading European MgB_2 producer, the Italian company Columbus Superconductors, has a program for developing also a superconductor with low AC losses of the material.

At NTNU/SINTEF a system for measurements of AC losses on short superconducting wires was finalized during spring 2012. The task is to perform systematic measurements of AC losses in superconducting wires as function of magnetic field, current and temperature. Particularly the relationship between the twist pitch and the losses of multifilamentary wires should be evaluated. The twist pitch will be simulated by cutting non-twisted wires in different lengths. The results of the measurements will be used as feedback to the superconductor development, and as input to designers of AC electric power components.





Forord

Denne masteroppgaven presenterer arbeidet som er utført våren 2013 som en del av min Master i teknologi-grad ved Institutt for elkraftteknikk, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Hovedhensikten med denne masteroppgaven var å finne forholdet mellom slaglengde og AC-tap i en multifilamentær leder ved ulike magnetfelt, frekvenser og temperaturer.

Jeg ønsker jeg å takke min veileder Niklas Magnusson, fra SINTEF Energiforskning, for all støtte, god hjelp og veiledning under denne perioden. Jeg vil også takke Frank Mauseth, min veileder på NTNU, og Magne Runde, fra SINTEF Energiforskning, for gode innspill jeg har fått.

Til slutt vil jeg takke mamma, pappa og Simon Jørgensen for all tålmodighet og hjelp.

Sandra Madeleine Lindau

Trondheim, 20. juni 2013.



Sammendrag

Superledende materialer kan lede likestrøm tilnærmet uten tap når de er kjølt ned til under sin kritiske temperatur.

I 2001 entret den nye og rimelige superlederen MgB₂ markedet. For øyeblikket blir denne lederen brukt i DC applikasjoner som blant annet i MR-apparater. Før man implementerer bruken av MgB₂ i kommersielle AC-applikasjoner må mer forskning på MgB₂ utføres. Det er flere grunnleggende egenskapene som må avdekkes, blant annet hvor store AC-tapene er, på hvilken måte avhenger de av magnetisk felt, strøm, temperatur og slaglengde, og kan de reduseres til et akseptabelt nivå for kommersielt brukt.

Denne masteroppgaven er en del av et større prosjekt ved NTNU/ SINTEF . I tidligere prosjekt har kalorimetriske AC-tapsmålinger, som en funksjon av magnetfelt og temperatur, blitt undersøkt på både rund MgB₂-superleder og MgB₂-tape. I tillegg har man undersøkt kritisk strøm på MgB₂-tape.

Målet for masteroppgaven var å finne forholdet mellom slaglengde og tap i en multifilamentær leder ved ulike magnetfelt, frekvenser og temperaturer. Kalorimetriske AC-tapsmålinger blitt utført på totalt 7 ulike lengder av en rund multifilamentær MgB₂-leder. Disse målingene har blitt utført ved å påføre et vekslende magnetfelt fra 40 mT til 210 mT med en frekvens på mellom 15 Hz og 260 Hz ved tre ulike temperaturer.

Ved 50 Hz, 100 mT og 35 K minsker AC-tapene med cirka en faktor 6 ved å redusere prøvelengden fra 12 mm, 29 mm eller 50 mm til 3 mm. Fra teoretiske beregninger kan man fra dette anta at ved å redusere slaglengden i en lang prøve fra 24 mm til 6 mm får man tilnærmet maksimalt utbytte av å tvinne prøven.





Summary

Superconductive materials can conduct DC currents without energy losses when cooled down below their critical temperature. However, under AC conditions, energy losses appear in the superconductor.

In 2001 the new and inexpensive superconductor MgB_2 entered the market. Currently this conductor is used in DC applications such as MRI, but before implementing the use of MgB_2 in AC applications more research has to be carried out. The basic questions are how large are the AC losses, in what way do they depend on magnetic field, current and temperature, and can they be reduced to a level acceptable for commercial use?

This Master's thesis is a part of a larger work at NTNU/SINTEF. In earlier projects calorimetric AC loss measurements have been performed on an MgB_2 round wire and tape, and there have been performed critical currents on the MgB_2 tape.

The aim for the Master's thesis was to find the relationship between the twist pitch and the losses of a multifilamentary wire. Calorimetric AC loss measurements have been performed on seven different lengths, from 3 mm to 50 mm, of the round multifilamentary MgB_2 wire. These measurements have been performed by applying AC magnetic fields from 40 mT to 210 mT with a frequency between 15 Hz to 260 Hz at three different temperatures.

At 50 Hz, 100 mT and 35 K the AC losses reduces by a factor of 6 by reducing the sample length of 12 mm, 29 mm or 50 mm to 3 mm. From theoretical calculations, it is believed that by reducing the twist pitch of a long sample from 24 mm to 6 mm the benefit from twisting will be at a maximum.



Innhold

1. Innledning.....	1
2. Teori.....	3
2.1 Grunnleggende teori: Superledere.....	3
2.2 AC-tap.....	4
2.2.1 Hysteresetap.....	4
2.2.2 Tap på grunn av koblingsstrømmer.....	5
2.2.3 Virvelstrømstap.....	9
3. Eksperimentelt	11
3.1 Prøvebeskrivelse.....	11
3.2 Eksperimentelt oppsett.....	12
3.2.1 Vakuumkryostaten	12
3.2.2 Måleoppsettet.....	14
4. AC-tapsmålinger	17
4.1 Kalorimetrisk målemetode.....	18
4.2 Utregning av kritisk lengde.....	18
4.3 Eksperimentell metode	21
4.3.1 Forberedelse av prøvelengdene.....	21
4.3.2 Kobbertermometer og heater	22
4.3.3 Forberedelser før måling av korte MgB ₂ -prøver	24
4.3.4 Måleprosedyre	25
5. Resultat.....	27
5.1 Målingsrunde 1-3	27
5.1.1 Resultater	29
5.1.2 Resultater med interpolerte og ekstrapolerte verdier.....	30
5.2 Målingsrunde 4-6	32
5.2.1 Resultater	33
5.3 Hysteresetap	36
5.4 Virvelstrømstap	37
6. Diskusjon	38
6.1 Sammenligning av resultater.....	38
6.2 Feilkilder	40
7. Konklusjon.....	42
8. Forslag til videre arbeid.....	43

Referanser	44
Vedlegg I.....	i
Vedlegg II	v
Vedlegg III.....	vi
Vedlegg IV	vii





1. Innledning

Superledende materialer kan lede likestrøm tilnærmet uten tap når de er kjølt ned til under sin kritiske temperatur. I dag er superledere i kommersielt bruk i DC-apparater som blant annet MR-apparater og induksjonsovner. Under AC-forhold vil tap oppstå i superlederen. Det har blitt gjort mye forskning på superledere som blant annet BSCCO/Ag for å minimalisere AC-tapene, men dette har ikke resultert i noe kommersielle gjennombrudd.

I 2001 entret den nye og rimelige superlederen MgB₂ markedet. For øyeblikket brukes denne lederen i DC-apparater som MR. Før man implementerer bruken av MgB₂ i AC-apparater må mer forskning utføres. Skal MgB₂ implementeres i AC-apparater må den samlede effektbruken være lavere enn hos konkurrerende tilsvarende utstyr. Det er flere grunnleggende egenskapene som må avdekkes, blant annet hvor store AC-tapene er, på hvilken måte avhenger de av magnetisk felt, strøm, temperatur og slaglengde, og kan de reduseres til et akseptabelt nivå for kommersielt brukt.

Denne masteroppgaven er en del av et større prosjekt ved NTNU/ SINTEF. Våren 2012 ble et apparat som kan utføre målinger av AC-tap på korte superledere fullført. Siden den gang har det blitt utført AC-tapmålinger for både rund MgB₂-superleder og MgB₂-tape, i tillegg har det blitt utført måling av kritisk strøm på MgB₂-tape.

Målet for denne masteroppgaven er å finne forholdet mellom slaglengde og tap i en multifilamentær leder. For å finne dette forholdet har kalorimetrisk AC-tapmålinger blitt utført på totalt 7 ulike lengder av en rund multifilamentær MgB₂-leder. Disse målingene har blitt utført ved å påføre et vekslende magnetfelt fra 40 mT til 210 mT med en frekvens på mellom 15 Hz og 260 Hz ved tre ulike temperaturer.

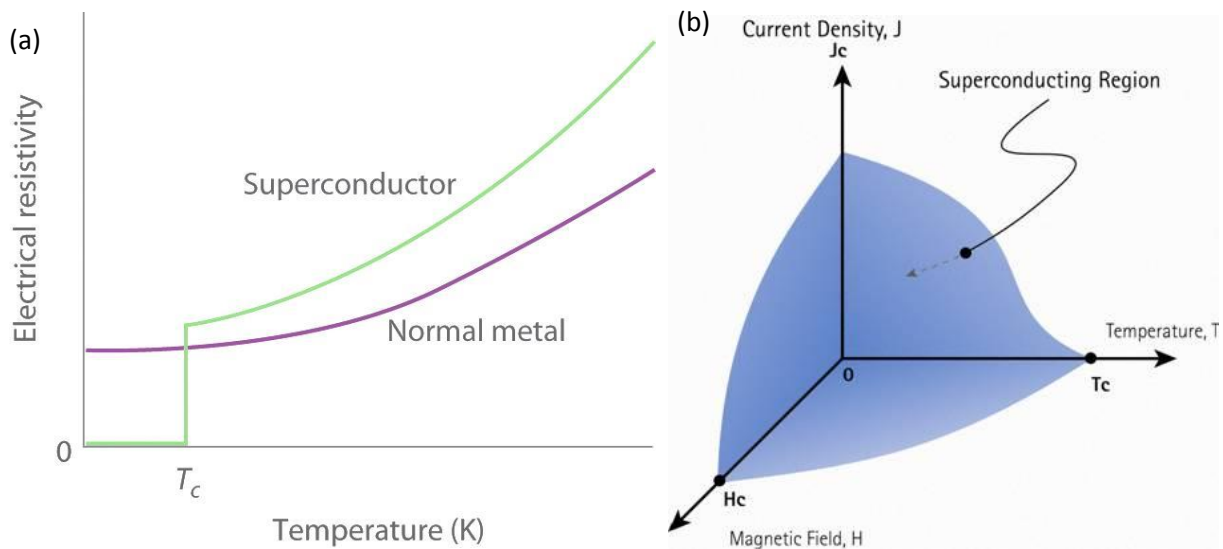


2. Teori

2.1 Grunnleggende teori: Superledere

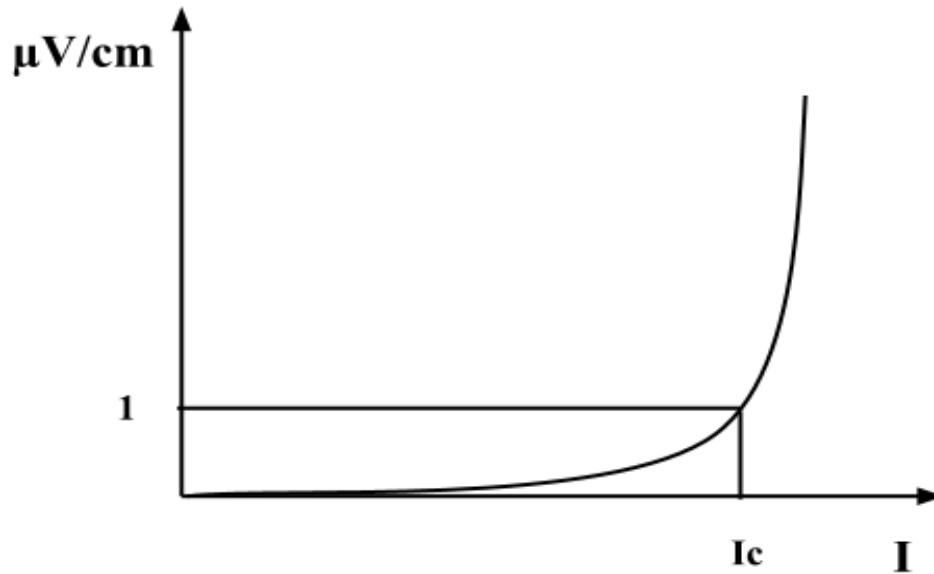
En superleder er et materiale som leder likestrøm tapsfritt under gitte forhold (Elk, n.d.). Et av kriteriene for at en superleder skal bli superledende er blant annet at den må være kaldere enn en gitt karakteristisk kritisk temperatur. I normalt ledende materialer, som kobber, øker resistansen jevnlig ved økende temperatur T (Averill and Eldredge). Forskjellen mellom forholdet I resistans og temperatur i normalt ledende metaller og superledere er vist i Figur 2.1 (a).

I tillegg til kritisk temperatur (T_c) er den superledende tilstanden begrenset av det kritiske magnetfeltet (H_c) og den kritiske strømtettheten (J_c) i superlederen (Glowacki, 1999). Figur 2.1 (b) illustrerer det gjensidig avhengige forholdet mellom T_c , H_c og J_c . Det blå representerer området hvor materialet er superledende.



Figur 2.1. (a) Motstand versus temperatur i en normal leder og en superleder (Averill and Eldredge, 2006). (b) Skjematisk tegning over hvor et superledende materiale er superledende i forhold til strømtetthet, magnetfelt og temperatur (Courtesy AMSC).

Den kritiske strømmen ved en gitt kritisk temperatur og/ eller kritisk magnetfelt finner man ved å bruke $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ -kriteriet. Dette gjøres ved å måle spenningen over superlederen mens man påfører en DC-strøm i superlederen. Strømmen som er påført når man måler $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ i superlederen er den kritiske strømmen. En typisk kurve for $\mu\text{V}/\text{cm}$ som funksjon av strøm er vist i Figur 2.2.



Figur 2.2. En typisk kurve av $\mu\text{V}/\text{cm}$ som en funksjon av strøm i en superleder. Kritisk strøm I_c er her funnet ved hjelp av $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ -kriteriet.

2.2 AC-tap

Når man påfører vekselstrøm eller et vekslende magnetisk felt på en superleder vil flere ulike tap oppstå, blant annet hysterese-tap, virvelstrømskoblingstap og virvelstrømstap.

AC-tapene for en gitt superleder er avhengig av temperatur T , magnetfelt B , transportstrøm I og frekvens f (Taxt, Magnusson og Runde, 2012)

$$P_{ac} = F(T, B, I, f) \quad (2.1)$$

2.2.1 Hysterese-tap

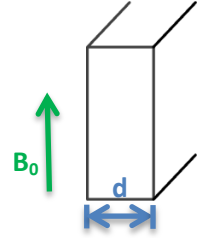
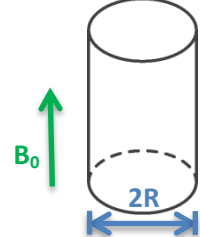
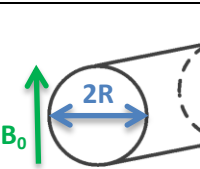
Hysterese-tap vil oppstå under magnetiseringskurvens syklus. Disse tapene kan regnes ut på følgende måte (Fossheim og Sudbø, 2004)

$$Q_m = \oint M dB \quad (2.2)$$

hvor Q_m er definert som tap per felt-syklus. Det vil si at selve hysterese-tapet er lineært avhengig av frekvens.

Som vist i Tabell 2.1 er størrelsen på tapene avhengig av geometri og dimensjon, feltets amplitude B_a , og penetrasjonsfeltet B_p .

Tabell 2.1: Magnetisk tap per syklus for ulike prøvegeometrier, hvor B_a er feltets amplitude og B_p er penetrasjonsfeltet. (Ciszek, et. al, 1995)

Prøvegeometri	Q_m [J/m ³]		B_p
	$Q_m = \frac{2B_a^3}{3\mu_0 B_p} \quad (2.3)$	$B_a \leq B_p$	$\mu_0 J_c d / 2$
	$Q_m = \frac{2B_a B_p}{3\mu_0} \left(3 - 2 \frac{B_p}{B_a} \right) \quad (2.4)$	$B_a > B_p$	
	$Q_m = \frac{2}{3\mu_0} \frac{B_a^3}{B_p} \left(2 - \frac{B_a}{B_p} \right) \quad (2.5)$	$B_a \leq B_p$	$\mu_0 J_c R$
	$Q_m = \frac{2B_a B_p}{3\mu_0} \left(2 - \frac{B_p}{B_a} \right) \quad (2.6)$	$B_a > B_p$	
	$Q_m = \frac{4B_a^3}{3\mu_0 B_p} \left(2 - \frac{B_a}{B_p} \right) \quad (2.7)$	$B_a \leq B_p$	$2\mu_0 J_c R / \pi$
	$Q_m = \frac{4B_a B_p}{3\mu_0} \left(2 - \frac{B_p}{B_a} \right) \quad (2.8)$	$B_a > B_p$	

Hysteresetapene kan reduseres ved å minske dimensjonene til lederen. For å opprettholde lik kritisk strømkapasitet kan dette løses ved å la lederen være bygd opp av flere små filamenter istedenfor en kompakt leder. På grunnlag av hysteresetapene bør ledere med høy strømkapasitet bygges opp av flere filamenter (Fossheim og Sudbø, 2004). Derimot vil ikke det å dele opp en superleder i mange filamenter føre til lavere AC-tap dersom filamentene er fullt koblet av koblingsstrømmer. Dette fenomenet vil bli forklart i neste delkapittel.

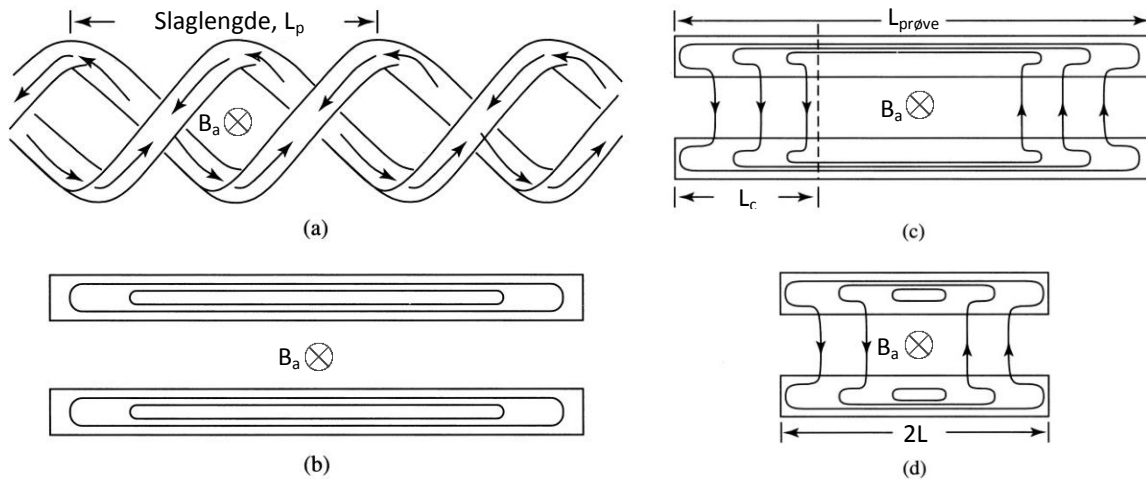
2.2.2 Tap på grunn av koblingsstrømmer

Koblingsstrømmer er en type virvelstrøm som oppstår mellom filamentene i en multifilamentær superleder fordi et eksternt vekslende magnetfelt kobler sammen filamentene (Oomen, 2000). Det magnetiske feltet vil i følge Faradays lov indusere et elektrisk felt som vil være ekvivalent til spenningen over en lukket sløyfe. Det er når denne spenningsforskjellen mellom to filamenter blir stor nok at den driver koblingsstrømmer rundt sløyfa. Disse strømmene fører til koblingstap over matriksen og økt hysteresetap.

Spenningsforskjellen mellom filamentene øker ved økende lengde på superlederen. Når en lang superledende prøve $L_{prøve}$ uten tvunnede filamenter er lengre enn kritisk lengde L_c , vil det føre til at koblingsstrømmene mellom filamentene være fullt koblet.

Figur 2.3 viser en skjematisk tegning av koblingsstrømmer mellom to filamenter i en superledende rund leder eller tape.

AC-tap i MgB₂-superleder



Figur 2.3. Det magnetiske feltet er orientert inn i tegningen og koblingsstrømmene kan man se i (a), (c) og (d) illustrert med piler. (a) Koblingsstrømmer i to filamenter i en tvunnen leder. Partiell dekobling oppstår når $L_p \ll 2L_c$. (b), (c) og (d) viser koblingsstrømmene mellom to parallelle filamenter i ulike situasjoner for: (b) Ukoblede filamenter ($B_a = 0$ eller $\rho_m \rightarrow \infty$); (c) Koblingsstrømmer for en leder med lengde $L_{prøve} \gg L_c$; og (d) Koblingsstrømmer for en leder med lengde $L_{prøve} \ll L_c$. (Fossheim, 1991)

Når lengden til en superledende prøve er kortere enn den kritiske lengden L_c vil koblingsstrømmer bare delvis passere gjennom matriksen og filamentene, som vist i Figur 2.3 (d). Matriks er det ikke-superledende materialet som omgir de superledende filamentene. Når en superledende prøve er lengre enn den kritiske lengden L_c vil filamentene bli mettet ved kritisk strøm og full kobling vil oppstå, som vist i Figur 2.3 (c), og strømsløyvene vil bli lukket over matriksen. Når en multifilamentær superleder er fullt koblet vil den ha et høyere AC-tap enn en tilsvarende enkel superleder.

Den kritiske lengden L_c til en gitt superleder i en gitt temperatur kan regnes ut og er avhengig frekvensen og det påførte magnetfeltet. Ved et sinusformet felt er den kritiske lengden L_c til en multifilamentær rund superleder, hvor avstanden mellom filamentene er parallelle i forhold til hverandre og vinkelrett i forhold til det magnetiske feltet, gitt av (Wilson, 1983):

$$L_c = 4 \sqrt{\frac{\rho_m J_{c,fil} d_{fil}}{2\omega B_a}} \quad (2.9)$$

hvor L_c [m] er kritisk lengde, ρ_m [Ωm] er den spesifikke motstanden til matriksen, $J_{c,fil}$ [A/m^2] kritisk strømtetthet i et filament, d_{fil} [m] er diameteren for et filament, ω [Hz] er vinkelfrekvensen $2\pi f$ og B_a [T] er amplituden til det påførte magnetfeltet.

Koblingsstrømmene i en superleder kan reduseres betydelig ved å tvinne filamentene i superlederen med en slaglengde lik $L_p \ll 2L_c$ (Fossheim og Sudbø, 2004). Å tvinne filamentene med hverandre vil føre til at spenningen blir indusert rundt filamentsløyfa, som vist i Figur 2.3 (a). Dette gir prøven en effektiv lengde på halvparten av slaglengden L_p istedenfor prøvelengden $L_{prøve}$.

Så lenge filamentene i prøven ikke er fullt koblet kan koblingsstrømmene i tillegg reduseres ved å redusere dimensjonene av filamentene og ved å øke den spesifikke motstanden til matriksen.

Det er to typer tap som oppstår på grunn av koblingsstrømmer: koblingstrømstap og økt hysteretap.

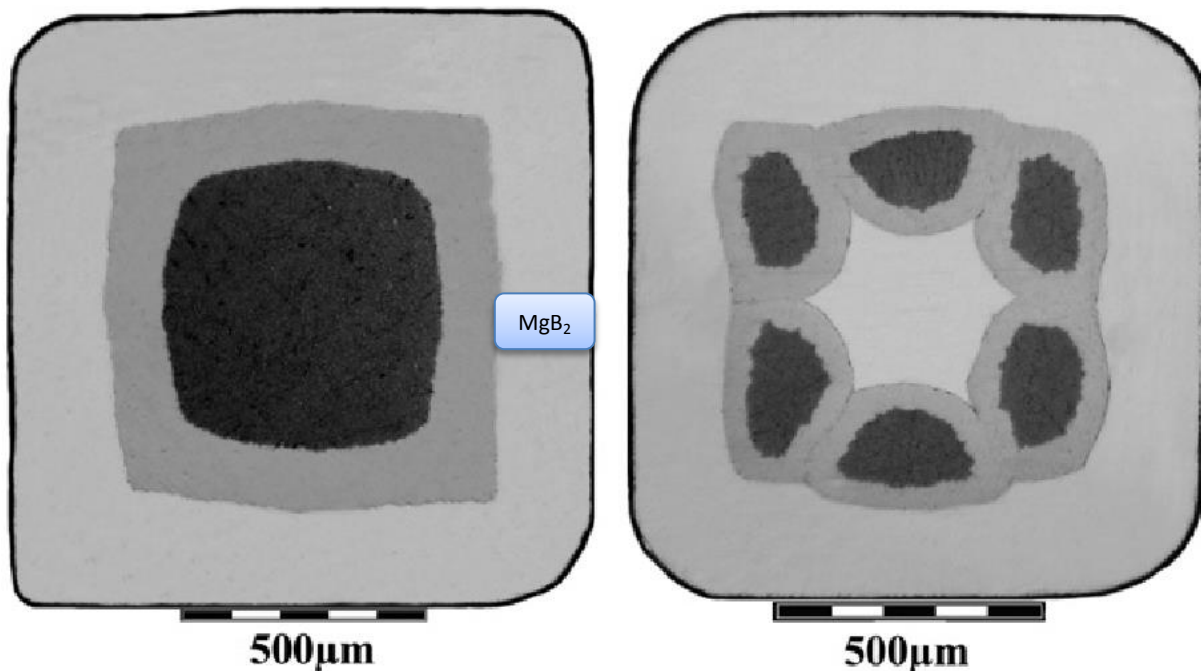
Koblingstrømstap

Koblingstrømstap oppstår på grunn av selve koblingsstrømmene som går fra filament til filament gjennom den ikke-superledende matriksen. Da vil det oppstå et resistivt tap over matriksen. Så lenge koblingsstrømmene i lederen er mindre enn kritisk strøm, det vil si at det ikke er full kobling, vil koblingstrømstapet være proporsjonalt med kvadratet av frekvensen

$$P_{cl} \sim f^2 \quad , \text{ når } I_{koblingsstrøm} < I_c \quad (2.10)$$

Når koblingsstrømmen har nådd kritisk strøm er superlederen mettet og høyere felt og frekvens vil ikke føre til høyere koblingstap.

Kováč, Šouc og Kováč (2012) utførte forsøk på en monofilamentær og multifilamentær superleder, vist i Figur 2.3. Resultatene deres viser tydelig at tapene i den multifilamentære lederen hadde et tap proporsjonalt med kvadratet av frekvensen, sammenlignet med den monofilamentære lederen hvor tapene var proporsjonalt med frekvensen. Her besto mest sannsynlig tapene i den multifilamentære lederen ved visse temperaturer hovedsakelig av koblingstrømstap og tapene i den monofilamentære av hysteresetap. Hysteresetapene i disse prøvene skal teoretisk sett være de samme ved full kobling.

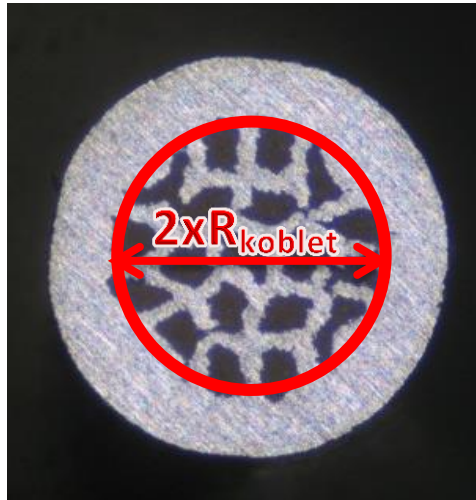


Figur 2.3. Optisk mikrobilde av to ledere. (a) viser en monofilamentær superleder med niobbarriere og en kappe av Glidcop. (b) viser en multifilamentær superleder med niobbarriere, en kappe av Glidcop og kobberkjerne (Kováč, Šouc og Kováč, 2012).

Økt hysterese­tap på grunn av koblings­strømmer

Den andre typen tap koblings­strømmene fører til er økt hysterese­tap. Hysterese­tapet øker fordi koblings­strømmene kobler filamentene elektromagnetisk sammen som fører til at hysterese­sen ikke vil kun oppstå i filamentene.

I en multifilamentær leder som ikke er koblet av koblings­strømmer vil hysterese­tapet være avhengig av filamentenes radius, mens i en leder som er fullt koblet av koblings­strømmene vil hysterese­tapet være avhengig av radiusen til det koblede området, som vist i Figur 2.4.



Figur 2.4. Optisk mikrobilde av Prøve 1. Den røde ringen viser området for det effektive arealet til lederen når den er fullt koblet.

Fra (2.8) i Tabell 2.1 får man at hysterese­tapene i en rund superleder som ikke er koblet lik

$$P_{hys_dekoblet} = Q_m \times A_{fil} \times f = \frac{16}{3\pi} f B_a I_c R_{fil} \quad (2.10)$$

hvor $P_{hys_dekoblet}$ [W/m] gir hysterese­tap per lengdeenhet, Q_m [J/m³] er magnetisk tap per syklus, A_{fil} [m²] er tvernsnittarealet til et filament, f [Hz] er frekvensen til det påførte magnetfeltet, I_c [A] er den kritiske strømmen i lederen, R_{fil} [m] er radiusen til et filament og B_a er amplituden til det påførte magnetfeltet. Det siste leddet i ligning (2.8) er ignorert i (2.10) og (2.11) da det ved høye felt vil være ubetydelig.

Til sammenligning er hysterese­tapene i en superleder som er fullt koblet avhengig av radiusen til det effektive arealet til den fullt koblede lederen, som vist i Figur 2.4

$$P_{hys_koblet} = Q_m \times A_{koblet} \times f = \frac{16}{3\pi} f B_a I_c R_{koblet} \quad (2.11)$$

hvor P_{hys_koblet} [W/m] gir hysterese­tap per lengdeenhet, Q_m [J/m³] er magnetisk tap per syklus, A_{koblet} [m²] er det effektive arealet til en fullt koblet leder, f [Hz] er frekvensen til det påførte magnetfeltet, I_c [A] er den kritiske strømmen i lederen, R_{koblet} [m] er den effektive radiusen til hysterese­sen og B_a [T] er amplituden til det påførte magnetfeltet.

2.2.3 Virvelstrømstap

Virvelstrømmer er elektriske strømmer som oppstår inne i elektriske ledere ved elektromagnetisk induksjon, på samme måte som koblingsstrømmer mellom filamentene. Dette skjer når en leder blir påført et variabelt magnetfelt.

De virvelstrømmene det er snakk om her fører til tap i matriksen, som kan regnes ut ved hjelp av (2.12). Denne ligningen gjelder for ledere med homogent materiale i et homogent variabelt magnetfelt og uten skinneffekt (Fiorillo, 2004)

$$P = \frac{\pi^2 d^2 B_a^2 f^2 A}{6k \rho_m}$$

(2.12)

hvor P [W/m] er effekttap per lengdeenhet, d [m] er tykkelsen på tynn plate eller diameter på leder, B_a [T] er magnetfeltets amplitude, f [Hz] er frekvens, A [m²] er materialets areal, k er konstant hvor $k=1$ for tynn plate og $k=2$ for tynn leder og ρ_m [Ω m] er den spesifikke motstanden til matriksen.



3. Eksperimentelt

Dette kapitlet starter med en beskrivelse av MgB₂ og av to MgB₂-ledere. Videre kommer en beskrivelse av apparaturen som er anvendt i dette prosjektet.

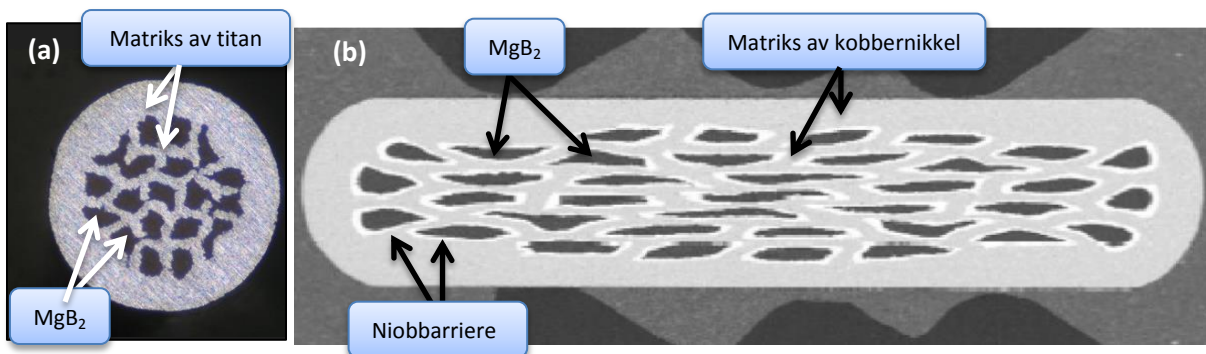
3.1 Prøvebeskrivelse

MgB₂ har vist seg å være et rimelig og praktisk superledende materiale. Dens superledende egenskaper ble ikke oppdaget før år 2001 (Nagamatsu, et al., 2001). Fordi det er et nokså nyoppdaget superledende materiale er det fortsatt på et tidlig stadium i utvikling sammenlignet med andre høytemperatur superledere (HTS) som BSCCO. MgB₂ har en kritisk temperatur på maksimum 39 K, som vil si at den har den høyeste kritiske temperaturen blant konvensjonelle superledere (Nagamatsu, et al., 2001), men den har en lavere kritisk temperatur enn typiske HTS som for eksempel BSCCO som har en kritisk temperatur på maksimum 123 K.

Videre kommer prøvebeskrivelse av to utvunnede multifilamentære MgB₂-ledere med en kritisk strøm på 37 K. Disse lederne er produsert av Columbus Superconductors for utviklingsformål.

Prøve 1, vist i Figur 3.1 (a), er en multifilamentær utvunnen rund leder som har 19 superledende filamenter av MgB₂. Den har et totalt tverrsnitt på 1,01 mm², hvorav 0,25 mm² av tverrsnittet består av MgB₂. Diameteren til den runde prøven er 1,14 mm. Matriksen består av titan, som er et ikke-magnetisk materiale.

Prøve 2, vist i Figur 3.1 (b), er en multifilamentær utvunnen tape som har av 37 superledende filamenter av MgB₂. Den har et totalt tverrsnitt på 3,99 mm², hvorav 0,73 mm² av tverrsnittet består av MgB₂. Dimensjonen til den rektangulære prøven er på 0,95 mm × 4.2 mm. Matriksen består av kobbernikkel (70/30), som er et ikke-magnetisk materiale, og filamentene har en barriere av niob.



Figur 3.1. Optisk mikrobilde av (a) tverrsnittet til Prøve1, rund MgB₂-prøve, og (b) tverrsnittet av Prøve 2, MgB₂-tape.

3.2 Eksperimentelt oppsett

Dette delkapittelet beskriver først vakuumbryostaten: Formål, begrensninger, valg av materiale og oppbygging. Deretter vil oppsettet rundt vakuumbryostaten bli forklart.

3.2.1 Vakuumbryostaten

Dette apparatet er basert på et apparat laget tidligere for å gjøre målinger BSCCO/Ag-tape (Magnusson og Hörnfeldt, 1998; Magnusson, et al, 2001), og ble slutført i løpet av våren 2012. Det er spesielt designet for å gjøre kalorimetrisk målinger av AC-tap i MgB₂ som oppstår på grunn av vekselstrøm og påført vekslende magnetfelt i virkelighetsnære forhold (Taxt, Magnusson og Runde, 2012).

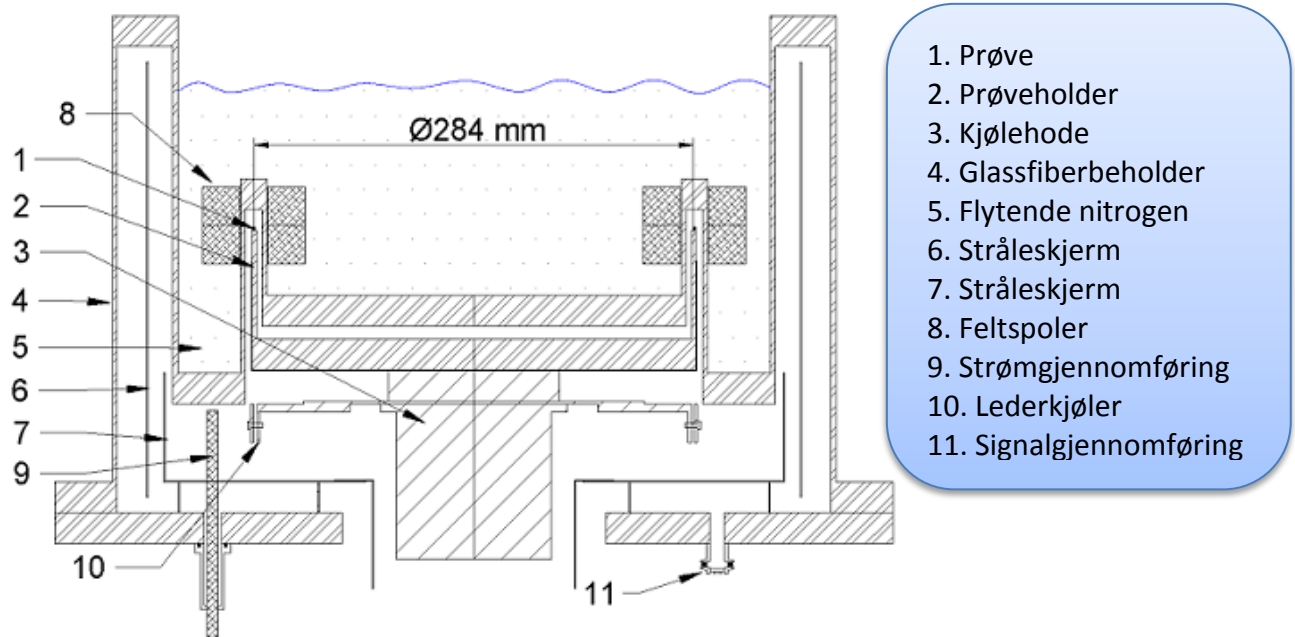
Apparatet er designet for målinger ved temperaturer ned til 20 K. Ved 50 Hz kan apparaturen levere en transportstrøm på opp til 200 A_{peak} og et påført magnetfelt opptil 1 T_{peak}, både hver for seg og samtidig i fase (Taxt, Magnusson and Runde, 2012). I tillegg er det mulig med frekvensomformer å variere frekvensen fra 15 Hz.

Det var flere begrensninger på apparatets design og materialvalget til beholderen som omslutter vakuumbryostaten. Disse begrensningene er gitt av: lav måletemperatur på under 40 K; lavt trykk i apparatet; høyt magnetisk felt; og høy transportstrøm (Taxt, Magnusson og Runde, 2012). Beholderen til apparatet er laget av glassfiber-armert plast og består av sylindere og plater som er limt sammen. Glassfiber-armert plast er et ikke-ledende og sterkt materiale som hjelper til med å opprettholde den lave temperaturen i tillegg til at den har en termisk sammentrekning som kan sammenlignes med metaller (Taxt, Magnusson og Runde, 2012). Selve apparatet består av to deler som er forseglet med en O-ring: Den øvre og nedre del av kryostaten. Den øvre delen av kryostaten fungerer som ett lokk som kan tas av under klargjøringen av superledende prøve, i tillegg er det i denne feltspolene sitter. Når den øvre og nedre delen av kryostaten er satt sammen, kan innsiden av apparatet vakuumeres og kjøles ned. Det er der inne kaldhodet, prøveholderen og prøven er lokalisert.

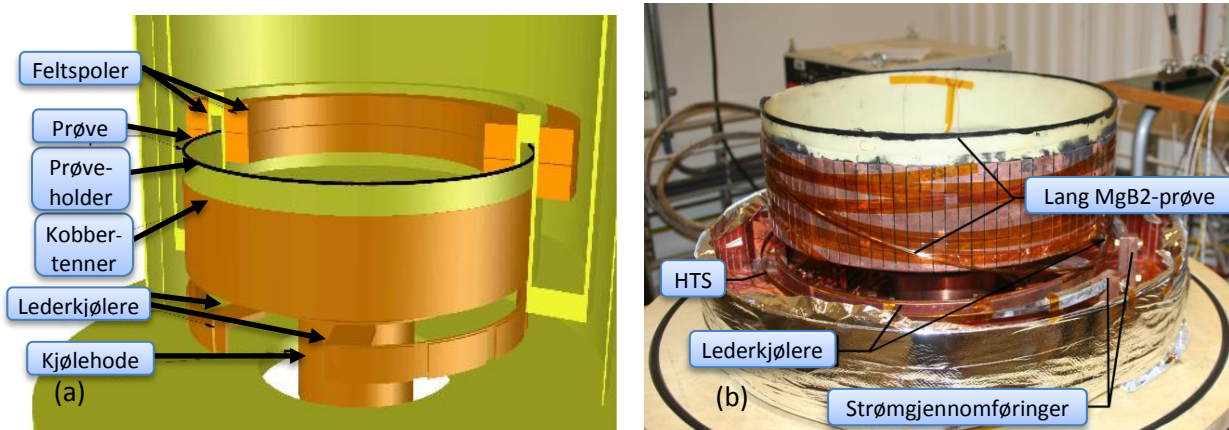
Figur 3.2 viser tverrsnittet av det sylindriske måleapparatet. Figur 3.3 (a) viser en tredimensjonal oversikt av systemet, mens Figur 3.3 (b) viser et fotografi av systemet. Ved målinger på lange prøver hvor man ønsker å påføre strøm i superlederen kommer, som vist i Figur 3.2, kommer transportstrømmen inn i vakuumbryostaten gjennom en strømgjennomføring (9) laget av kobber. Videre går transportstrømmen gjennom en BSCCO/Ag-tape, som er en høytemperatur superleder (HTS), før den videre går gjennom lederkjøleren (10). Ved lederkjøleren blir BSCCO/Ag-tapen presset sammen med MgB₂-prøven ved hjelp av skruer. Lederkjøleren er laget av kobber og er i termisk kontakt med kjølehodet (3) som er festet til heliumgasskjølemaskinen. For å hindre elektrisk ledning mellom lederkjøleren og lederen er lederkjøleren dekket med plast.

Videre går MgB₂-prøven rundt den sylindriske prøveholderen (2), som har en diameter på 0,28 m. Prøveholderen er 3 mm tykk og består av glassfiber-armert plast, hvor 0,5 mm tykke "kobbertenner" er limt på utsiden av prøveholderen, som vist i Figur 3.3 (a). Disse kobbertennene er i termisk kontakt med kaldhodet og sikrer derfor god kjøling av superlederen før den når toppen av prøveholdere. Kobberet er delt inn i "tenner" for å unngå store induerte strømmer i kobberet mens den er eksponert for vekslende magnetfelt. Som man kan se i Figur 3.3 (b) og Figur 4.1 (b) går ikke kobbertennene til toppen av prøveholderen, men avslutter 20 mm under. Dette er gjort for å

muliggjøre god styring av temperaturen på prøven ved måleområdet. Dersom “kobbertennene” hadde vært plassert nærmere måleområdet ville varme produsert under målingene lettere blitt ledet bort fra prøven, noe som både vil gjøre det vanskeligere å kontrollere og måle korrekt temperatur og temperaturstigning. I Figur 3.3 (b) kan det sees hvordan en lang prøveleder er plassert rundt prøveholderen. Prøven (1) er limt på toppen av prøveholderen ved hjelp av Stycast 2850, et aluminium-oksid epoxylim.



Figur 3.2. Tverrsnitt av apparatet. Systemet er sylindrisk symmetrisk rundt sentrum (Taxt, Magnusson and Runde, 2012).



Figur 3.3. (a) 3D-modell av vakuumkryostaten (Taxt, 2012). (b) Bilde av den nedre delen av vakuumkryostaten og prøveholderen sammen med en lang MgB₂-prøve (Taxt, Magnusson and Runde, 2012).

Når MgB₂-prøven skal påføres en transportstrøm er prøven forholdsvis lang og er anordnet i en sirkel rundt prøveholderen og er festet på toppen av prøveholderen for å gjøre det mulig å påføre måleområdet magnetisk felt ved hjelp av feltspolene (Taxt, Magnusson and Runde, 2012). Ved målinger på korte MgB₂-prøver blir de festet direkte på prøveholderen.

I midten av den øvre delen av glassfiberbeholderen (4) er det en fordykning. Denne fordypningen kan fylles med nitrogen for å redusere varmestrålingen fra omgivelsestemperaturen. I tillegg dekkes innsiden av veggene av den øvre delen av glassfiberbeholderen med superisolasjon, kalt stråleskjerm (6 og 7). Superisolasjonen er en aluminium mylar folie og brukes for å minimere effekten fra varmestrålingen. For å redusere varmestrålingen ytterligere blir hele prøveholderen dekket med superisolasjon etter at prøven(e) er festet på den.

Feltspolene (8) er laget av kobber og er plassert på begge sider av prøven i den øvre delen av vakuumbryostaten. Spenningsignalene og de små strømmene som brukes for måleformål går gjennom signalgjennomføringene (11) plassert på den nedre delen av vakuumbryostaten. Derfra går signalene og strømmene videre til strømkilde og Data logger.

3.2.2 Måleoppsettet

Under målingene ble det satt opp flere ulike oppsett etter behov. Disse oppsettene vil bli presentert på de neste sidene.

Tabell 3.1 viser en oversikt over hvilket utstyr som er brukt i måleoppsettet.

Måleoppsettet for de ulike målingene er vist i Vedlegg I.

Tabell 3.1: Utstyr bruk i måleoppsettet

Utstyr	Produsent	Model	Ytelse
Cooling Machine	Leybold	Coolpak 600	20 W kjølekapasitet ved 20 K, ~0 W ved T<20K
Vakuumpumpe, primær	Alcatel	ATP 100	High vacuum pump, kan produsere 10 ⁻⁹ mbar. Avhengig av sekundærpumpe.
Vakuumpumpe, sekundær	Alcatel/Leroy Somer	CF29	Rotary vane pump, kan produsere 2x10 ⁻² mbar.
Data logger	Agilent	Agilent 34970A Card: 34970A	% nøyaktighet ved 1-års kalibrering og 100 mV: 0,005 av input og + 0,004 av range
Kobbertermometer			D=0,1 mm. For mer info., se Vedlegg II og III.
Heatertråd			Cirka 80 Ω/m
MgB ₂ -superleder	Colombus Superconductors	Rund leder	
Kondensator-batteri	Arcotronics		24 á 300 µF ±5%. Un=750V. Urms=440V.
Transformator		Sveisettransformator	Adjustable air-gap transformator; Output: 150 A/60 V
Programmerbar AC-kilde.	Chroma	Model 61603	Frekvensomformer. Output: Max Power= 1,5kVA, Max V=300V. Max I _{rms} =12A, Frequency range: 15Hz-1kHz
Jernkjerner			For å lage transformator med omformingstall etter behov.



4. AC-tapsmålinger

For å redusere tap på grunn av koblingsstrømmer som oppstår mellom filamentene er det interessant å vite den nødvendige slaglengde for å få ned tapene til et tilfredsstillende nivå. Som forklart i kapittel 2.2.2 oppstår den partielle dekoblingen når $L_p < 2L_c$. Det vil si at man har fullstendig kobling av koblingsstrømmer mellom filamentene om slaglengden L_p er dobbelt så stor som den kritiske lengden L_c . Videre kan man anta at koblingsstrømmene er ved et akseptabelt lavt nivå når $L_p \ll L_c$.

AC-tapsmålingene utføres for å finne nødvendig slaglengde til superlederen. Som nevnt i kapittel 2.2.2 kan lengden, $L_{prøve}$, til en superledende prøve med parallelle filamenter representere en lignende prøve hvor slaglengden L_p er det dobbelt så lang som prøven, det vil si $2L_{prøve} = L_p$. Da vil en prøvelengde på 3 mm representere en tilsvarende leder med slaglengde på 6 mm.

Før forberedelsene av prøvelengdene gjøres noen utregninger for å få en pekepinn på hvor man kan forvente å finne kritisk lengde og for å lettere velge interessante prøvelengder.

Dette kapitlet starter med å forklare den eksperimentelle metoden som blir brukt ved AC-tapsmålingene som er utført på de ulike lengdene av Prøve 1. Før forberedelsene av prøvelengdene gjøres en teoretisk utregning av kritisk lengde på Prøve 1 for å gi en pekepinn på hvor lange MgB₂-prøvene burde være. Deretter blir den eksperimentelle metoden blir presentert. Den eksperimentelle metoden beskriver blant annet forberedelse av selve prøvelengdene, måleprosedyre og bearbeiding av data.

4.1 Kalorimetrisk målemetode

Når det påføres et vekslende magnetfelt på en MgB₂-prøve vil det oppstå effekttap i prøven. Dette effekttapet kan man finne ved å bruke en kalorimetrisk målemetode. Dette gjøres ved å sammenligne temperaturforandringen som oppstår i prøven under AC-tapsmålingen med temperaturforandring i prøven når den påføres en kjent effekt fra en heater som er tvunnet rundt MgB₂-prøven. Nærmere forklaring på hvordan man måler temperatur i prøven og hvordan heateren er tvunnet rundt prøven finner man i kapittel 4.3.2. Teorien bak den kalorimetriske målemetoden blir nærmere beskrevet i de neste avsnittene

I et adiabatisk system er effekttapet gitt ved (Taxt, Magnusson and Runde, 2012)

$$P_{AC} = C \frac{\Delta T_{AC}}{\Delta t_{AC}} \quad (4.1)$$

hvor C er varmekapasiteten, ΔT_{AC} er temperaturforandringen og Δt_{AC} er måleperioden. I dette tilfellet er C ukjent og systemet er ikke fullt ut adiabatisk. Dette er årsaken til at man kalibrerer systemet ved å måle temperaturforandringen fra en kjent varmetilførsel med en kjent effekt, som i dette tilfellet vil si en heatertråd som er surret rundt prøven. Varmekapasiteten kan da elimineres fra (4.1) og effekttapet blir da gitt ved (Taxt, Magnusson and Runde, 2012)

$$P_{AC} = \frac{\Delta T_{AC} \Delta t_{cal}}{\Delta T_{cal} \Delta t_{AC}} P_{cal} \quad (4.2)$$

hvor ΔT_{cal} er MgB₂-prøvens temperaturøkning under kalibrering, Δt_{cal} kalibreringsperioden og P_{cal} effekten påført heateren som er tvunnet rundt prøven under kalibrering. Fordi (4.2) kun gjelder i et adiabatisk system velger man at $\Delta t_{AC} = \Delta t_{cal}$ (KILDE).

4.2 Utregning av kritisk lengde

Om man antar at avstanden mellom filamentene i Prøve 1 er konstant og er vinkelrette på det magnetiske feltet, kan man bruke (2.4) for å estimere den kritiske lengden L_c (Oomen, 2000).

Følgende utregninger er gjort for et magnetfelt tilsvarende $B_a = 0,1$, med en frekvens på $f = 50$ Hz, som gir $\omega = 2\pi f = 2\pi \times 50$ Hz og en temperatur på $T = 35$ K, som vil si at den gitte kritiske strømmen er ved 35 K.

Diameteren til filamentene ble funnet ved å bruke det totale arealet av MgB₂, gitt i kapittel 3.1, og dele det på antall filamenter:

$$d_{fil} = 2 \sqrt{\frac{A_{fil}}{\pi}} = 2 \sqrt{\frac{A_{MgB_2}/n_{fil}}{\pi}} = 2 \sqrt{\frac{0.25 \times 10^{-6} m^2 / 19}{\pi}} = 1.294 \times 10^{-4} m \quad (4.3)$$

Den kritiske strømtettheten J_c for Prøve 1 kan antas å være den samme som den kritiske strømtettheten i Prøve 2. I følge målinger utført av Taxt, et. al (2013) er den kritiske strømmen ved omtrent 35 K for Prøve 2 130 A. Dette gir

$$J_{c,fil} = J_{c,fil_Prøve1} = J_{c,fil_Prøve2} = \frac{I_{c_Prøve2}}{A_{MgB_2-Prøve2}} = \frac{130A}{0.73 \times 10^{-6}m^2} \approx 180 \times 10^6 A/m^2 \quad (4.4)$$

$\rho_{m,35}$ ble funnet ved å måle motstanden av en 10 cm lang prøve av Prøve 1 både i romtemperatur og i flytende nitrogen, som ga:

$$\begin{aligned} \rho_{m,297K} &= r_{measured,297K} \times A_{matrix} = \frac{U_{measured,297K}}{I_{measured,297K} \times l} \times (A_{sample} - A_{MgB_2}) \\ &= \frac{0.118V}{2.013A \times 0.1m} \times (1.01 - 0.25) \times 10^{-6}m^2 = 4.455 \times 10^{-7} \Omega m \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} \rho_{m,77K} &= r_{measured,77K} \times A_{matrix} = \frac{U_{measured,77K}}{I_{measured,77K} \times l} \times (A_{sample} - A_{MgB_2}) \\ &= \frac{0.033V}{2.013A \times 0.1m} \times (1.01 - 0.25) \times 10^{-6}m^2 = 1.246 \times 10^{-7} \Omega m \end{aligned} \quad (4.6)$$

Om man antar at $\rho_{m,35K} \approx \rho_{m,77K}$, får man

$$L_c = 4 \sqrt{\frac{\rho_{m,77K} J_{c,fil} d_{fil}}{2\omega B_a}} \approx 25.6 \text{ mm} \quad (4.7)$$

Ved å anta at $\rho_{m,35K} \approx \rho_{m,77K}$ blir beregnet kritisk lengde, L_c , av Prøve 1 omtrent 27 mm når den utsettes for 0,1 T ved 35 K.

Om man antar en lineær reduksjon av motstand, får man

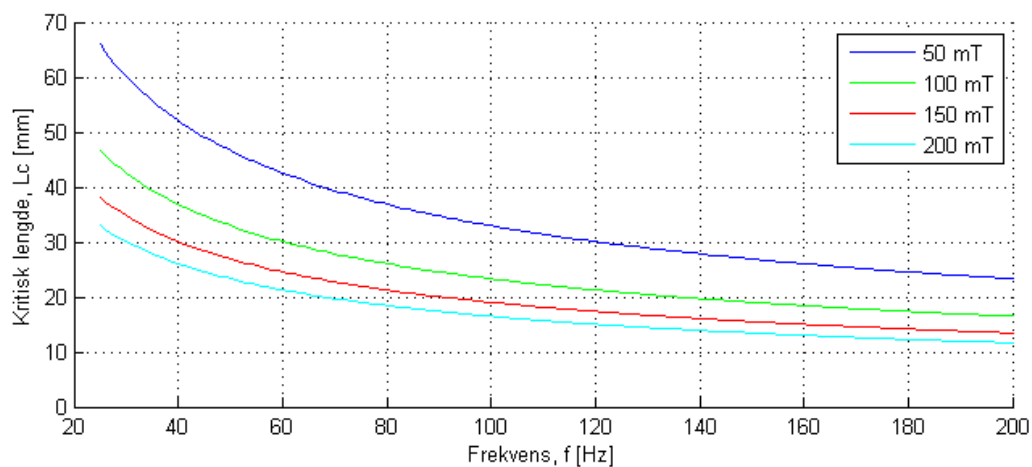
$$\rho_{m,35K} = 1.246 \times 10^{-7} - \frac{(4.445 - 1.246) \times 10^{-7}}{297 - 77} \times (77 - 35) = 0.6334 \times 10^{-7} \Omega m \quad (4.8)$$

som gir

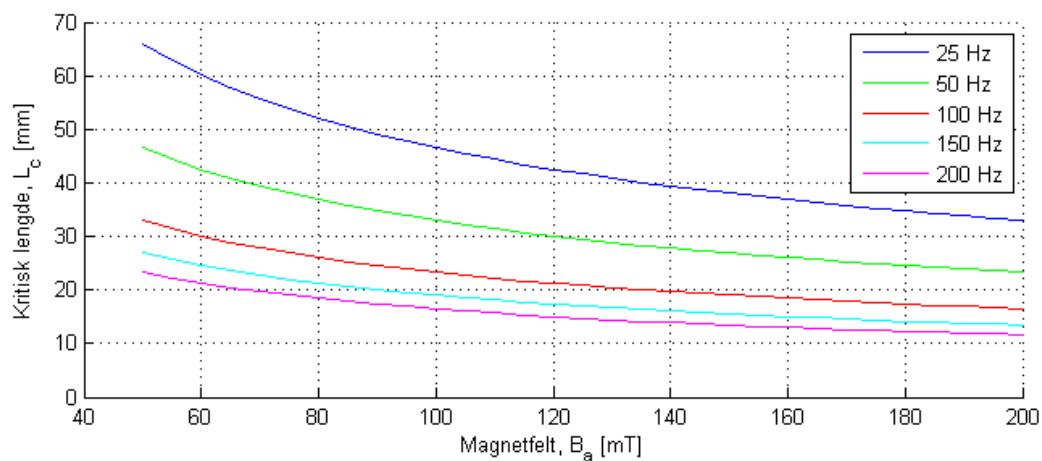
$$L_c = 4 \sqrt{\frac{\rho_{m,35K} J_{c,fil} d_{fil}}{2\omega B_a}} \approx 18.2 \text{ mm} \quad (4.9)$$

Ved å anta en lineær reduksjon av motstanden (4.8) blir beregnet kritisk lengde, L_c , av Prøve 1 omtrent 18 mm når den utsettes for 0,1 T ved 35 K.

Figur 4.1 og 4.2 viser teoretisk kritisk lengde av Prøve 1 som funksjon av henholdsvis frekvens og påført magnetfelt.



Figur 4.1. Kritisk lengde som funksjon av det påførte magnetfeltets frekvens, når det påførte magnetfeltet B_a er 50 mT, 100 mT, 150 mT og 200 mT.



Figur 4.2. Kritisk lengde som funksjon av det påførte magnetfeltet, når den påførte frekvensen f er 25 Hz, 50 Hz, 100 Hz, 150 Hz og 200 Hz.

4.3 Eksperimentell metode

I dette kapittelet beskrives først forberedelsene av de ulike prøvelengdene og hvordan og hvorfor kobbertermometer og heatertråd tvinnes rundt MgB₂-prøvene. Deretter beskrives det hvilke forberedelser som må gjøres på apparatet før målingene utføres, måleprosedyre og bearbeiding av data.

4.3.1 Forberedelse av prøvelengdene

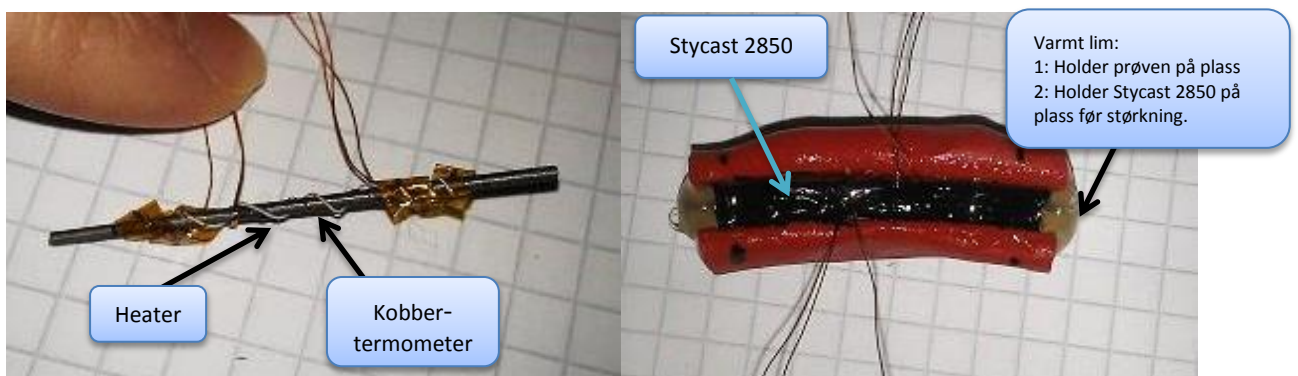
Ut i fra utregningene som ble gjort i kapittel 4.2 ble det bestemt å utføre målinger på 7 MgB₂-prøver på mellom 3 mm og 50 mm, nærmere bestemt 3 mm, 3 mm, 4 mm, 7 mm, 12 mm, 29 mm og 50 mm. I følge Brisgotti (2012), ansatt i Columbus Superconductors, blir MgB₂-superlederen mekanisk ødelagt ved kutting. Denne skaden opptrer opptil 3 mm inn i ledere, noe som også vil påvirke de elektriske lederegenskapene. For å minimere skadene som oppstår ved kutting ble det bestemt at prøvene skulle bli kuttet i lengder minst 8 mm lenger enn de ønskede prøvelengdene, for deretter å støpe lengdene i Stycast 2850. Dette blir gjort for å unngå større skade under sliping av MgB₂-superlederen. Prøvene ble støpt i støpeformer formet slik at de støpte prøvene kan plasseres på prøveholderen, noe som var spesielt viktig for de lengre prøvelengdene. Figur 4.3 viser bilder av formen for 50 mm lang prøve. Etter støping blir prøvene forsiktig slipt ned til korrekt prøvelengde ved hjelp av en slipemaskin med fint slipepapir.

Før støping må prøvene utstyres med kobbertermometere og heatere, som vist i Figur 4.4 (a) og Figur 4.4 (b). En støpt prøve i prøveform er vist i Figur 4.4 (b). Hvordan og hvorfor prøvene utstyres med kobbertermometer og heater blir beskrevet i kapittel 4.3.2.

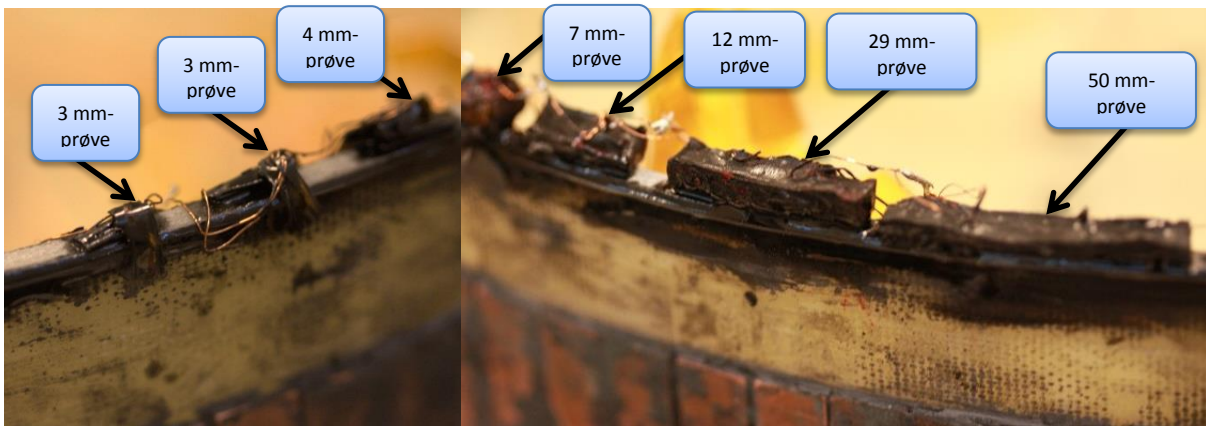
I Figur 4.5 kan man se hvordan prøvene er limt fast på prøveholderen.



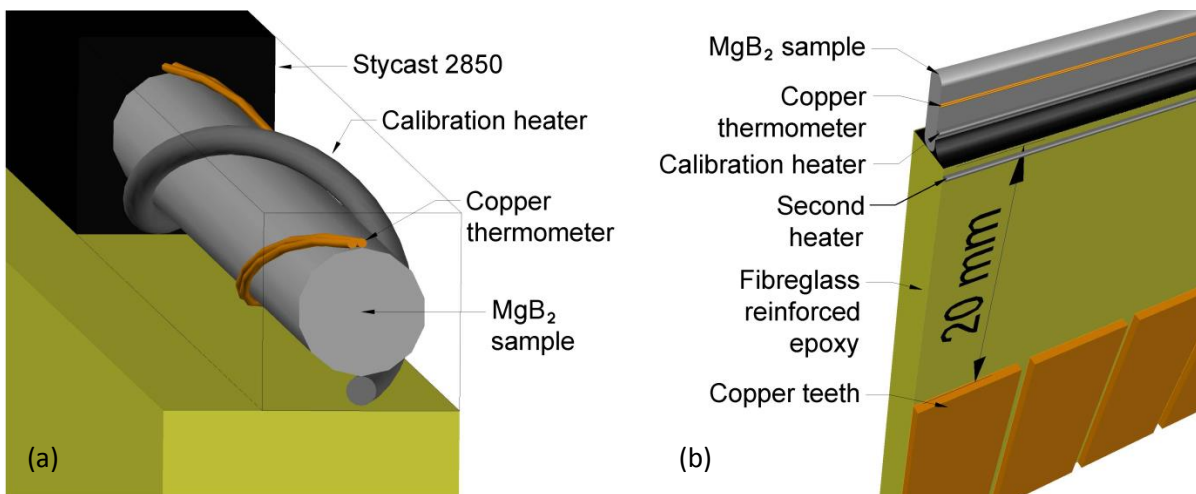
Figur 4.3. Form for 50 mm lang prøve. Prøveholder er laget av Fimo.



Figur 4.4. Forberedelse av 29 mm lang prøve. (a) Viser prøve med heater og kobbertermometer tvinnet rundt. Tape blir brukt for å hindre elektrisk ledning mellom heatertråd og kobbertermometer i loddepunktene. (b) Viser prøve støpt i Stycast 2850. Oppmerking viser hvor langt man kan file ned uten å tregge heater og kobbertermometer.



Figur 4.5. Prøver limt på prøveholderen og loddet sammen.



Figur 4.6. (a) Skisse av prøveordningen på en rund prøve. Heateren og kobbertermometeret er tvunnet rundt prøven og er limt på ved hjelp av Stycast 2850, en epoxy med aluminium-oksid, for å sikre god termisk kontakt (Taxt, Magnusson and Runde, 2012). (b) Skisse av prøveordningen sammen med kobbertennene (Taxt, Magnusson and Runde, 2012).

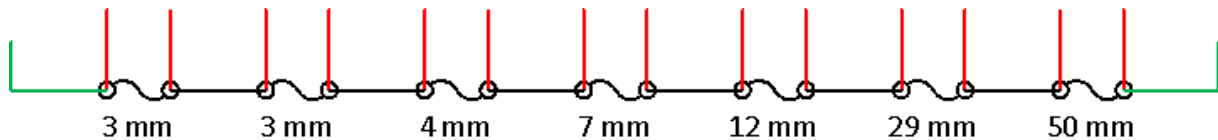
4.3.2 Kobbertermometer og heater

Det ble tvinnnet et kobbertermometer og en heater på hver av prøvelengdene, som vist i Figur 4.4 (a).

Kobbertermometeret

Kobbertermometeret er en 0,1 mm tykk kobbertråd som blir anvendt som et termometer ved å måle motstanden i kobbertråden.

Når motstanden i kobbertermometeret skal måles blir firepunkts målemetode på hvert enkelt termometer på hver av prøvene anvendt for å forsikre at målingen av motstanden er så nøyaktig som mulig, slik det er illustrert i Figur 4.7. Måleresultatene blir hentet ved hjelp av Data logger, som var programmert til å gi resultatene direkte ut i ohm.



Figur 4.7. Figuren illustrerer hvordan oppsettet for kobbertermometeret er og hvordan firepunkts målemetode er brukt på kobbertermometeret på hver enkelt leder. Den bølgete linjen illustrerer kobbertermometeret som er tvunnet rundt prøven, rundingene illustrerer loddepunkter på kobbertermometeret, de røde strekene illustrerer hvor spenningen blir målt og de grønne strekene illustrerer hvor strømmen går inn. De rette svarte strekene illustrerer kobbertråden som forbinder kobbertermometerne slik at man kun behøver en gjennomføring for strøm til kobbertermometeret.

Når MgB₂-prøvene er ferdig installert på prøveholderen, som vist i Figur 4.5, måles motstanden i kobbertermometret i omgivelsestemperatur for å finne R_0 for hver enkelt lengde, som vist i Vedlegg II. Deretter måles motstanden i prøvene når de er nedkjølt. Korrekt temperatur blir så regnet ut ved hjelp av tabellen i vedlegg III og MATLAB. Fordi Data logger kun viser motstand ble Tabell 4.1 ble laget for å lettere finne ut cirkatemperatur på lengdene mens målingene pågikk uten å måtte gjøre tidkrevende utregninger.

Tabell 4.1. Motstand i m Ω gitt ved ulike lengder og temperaturer.

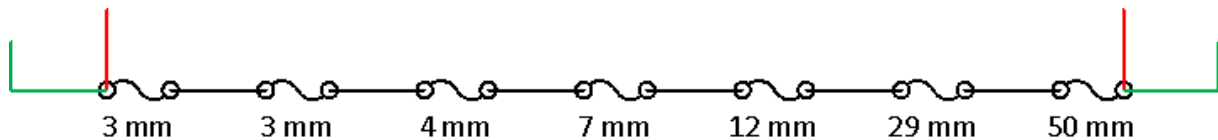
lengder\temp	29 K	30 K	31 K	32 K	33 K	34 K	35 K	36 K	37 K
3 mm ₁	2,8011	2,9443	3,1029	3,2792	3,4671	3,6727	3,8939	4,1307	4,3832
3 mm ₂	2,9186	3,0678	3,2331	3,4167	3,6125	3,8268	4,0573	4,3040	4,5670
4 mm	5,5879	5,8735	6,1898	6,5415	6,9163	7,3265	7,7678	8,2402	8,7438
7 mm	0,2051	0,2156	0,2272	0,2401	0,2539	0,2689	0,2851	0,3025	0,3209
12 mm	0,5468	0,5748	0,6057	0,6401	0,6768	0,7170	0,7602	0,8064	0,8557
29 mm	0,9840	1,0343	1,0900	1,1519	1,2180	1,2902	1,3679	1,4511	1,5398
50 mm	1,5931	1,6745	1,7647	1,8650	1,9719	2,0888	2,2146	2,3493	2,4929

Heater

Heatertråden er høyohmig med motstand på 80 Ω /m. Heatertråden blir brukt under kalibrering og for å varme opp prøvene til ønsket temperatur.

Det er lagt heatertråd rundt kaldhodet og prøveholderen, og det er tvinnet heatertråd rundt prøvene. Heatertrådene som er lagt rundt kaldhodet og prøveholderen blir brukt til å varme opp prøvene til riktig temperatur. Heatertråden som er tvunnen rundt prøvene blir brukt under kalibreringen, som er nærmere forklart i avsnitt 4.1.

Det er en heatertråd tvinnet rundt hver enkelt prøve. Figur 4.8 forklarer oppsettet til heatertråden. I motsetning til kobbertermometrene, hvor firepunkts målemetode anvendes for hvert enkelt termometer, blir det her valgt å måle spenningen over alle heatertrådene. Dette gjøres fordi det ikke er nok signalgjennomføringer til å utføre firepunkts målemetode på hver enkelt heatertråd. Heatertråden er høyohmig og det vil derfor ikke føre til nevneverdig målefeil ved å bruke denne metoden. Motstanden over hver av heatertrådene som sitter på enkelt lengde ble målt før vakuumkryostaten ble lukket igjen og AC-målingene ble utført. Fra disse motstandsmålingene ble Tabell 4.2 laget. Den viser det utregnede forholdstallet for hver enkelt leder. Forholdstallet sier hvor stor andelen av spenningen som blir målt som hører til den respektive lengden.



Figur 4.8. Figuren illustrerer hvordan oppsettet for heateren er og hvordan firepunkts målemetode er brukt. Den bølgete linjen illustrerer heateren som er tvunnet rundt prøven, rundingene illustrerer loddepunkter på heateren, de røde strekene illustrerer hvor spenningen blir målt og de grønne strekene illustrerer hvor strømmen går inn. De rette svarte strekene mellom heaterene illustrerer kobbertråden som forbinder heaterene.

Tabell 4.2. Forholdstallene for heaterene på de ulike lengdene.

Lengde	3 mm	3 mm	4 mm	7 mm	12 mm	29 mm	50 mm
Forholdstall	0,072330	0,078217	0,137090	0,107653	0,093356	0,191758	0,319595

4.3.3 Forberedelser før måling av korte MgB₂-prøver

Før prøven(e) plasseres på prøveholderen

- 1) Hver gjennomføring må kontrolleres at fungerer.
- 2) Hver ledning som er festet til gjennomføringene, både de på utsiden og innsiden av vakuumbrystaten, må sjekkes at fungerer. Merk hvilke ledninger som hører til hverandre på utsiden og innsiden.

Mens prøvene plasseres på prøveholderen

- 3) Lim MgB₂-prøven(e) på toppen av prøveholderen med Stycast 2850. Bruk gjerne tape for å holde prøven riktig på plass under tørking.

Etter at MgB₂-prøven(e) er plassert på prøveholderen

- 4) Lodd heater og kobbertermometer som er viklet rundt prøvene, heater som er rundt prøveholder og rundt kaldhodet med sine respektive kobberledere som går til gjennomføringene. Koble ledningene som kommer ut fra apparatet gjennom gjennomføringene til deres respektive plasser i Dataloggeren og/ eller strømforsyningen.
- 5) Forsikre at alle signalverdier som går til Data logger og/ eller strømforsyningen er som forventet (spenning, strøm og motstandsmålinger).
- 6) Plasser superisolasjonen nøye og forsiktig rundt lederkjøleren, prøveholderen, MgB₂ superlederen(e) med mer som forklart i seksjon 3.2. Ekstra superisolasjon kan bli plassert rundt lederen for å minimalisere varmestråling.
- 7) Lukk apparatet ved å plassere den øverste delen av fiberglassbeholderen på den lavere delen.

Videre forberedelser

- 8) Det er to vakuumpumper som brukes for å få lavt nok trykk. Slå på vakuumpumpene i riktig rekkefølge på riktig måte med hensyn til kjøling.
- 9) Når trykkmåleren viser et trykk på omtrent 10⁻² mbar, fyll reservoaret på toppen av apparatet med flytende nitrogen. Ved dette trykket kan kjølemaskinen også startes. Når kaldhodet fungerer som en kuldefelle og stoffer som oksygen og nitrogen blir til væske som «fanges» ved kjølehodet, kan man endelig oppnå et trykk på under 10⁻³ mbar. Ved dette trykket kan varme hovedsakelig bli transportert via stråling. Det er som nevnt tidligere denne typen varmeoverføring superisolasjonen isolerer mot.

- 10) Når temperaturen har oppnådd en stabil kald nok temperatur er det klart for å gjøre målinger på MgB₂-prøven/MgB₂-prøvene.

Kort om måleprosedyre

- 11) Bruk eventuelt heatere som er plassert rundt prøveholderen for å øke temperaturen på MgB₂ prøven om det er ønskelig. Temperaturen på prøven(e) blir målt ved hjelp av kobbertermometerne som er tvunnet rundt prøven(e).
- 12) Ved måling av kritisk strøm påfør likestrøm i lederen. Kritisk strøm finner man, som forklart i 2.1.2 når spenningen over måleområdet er rundt 1 μV/cm.
- 13) Ved måling av tap ved vekslende magnetfelt påfør strøm til feltspolen som er i apparatet.

4.3.4 Måleprosedyre

Fordi målingene ønskes utført ved en viss temperatur ble en oversikt over hva slags motstand hver av MgB₂-prøvene har ved ulike temperaturer laget, som vist i Tabell 4.1. Ønskes en høyere temperatur på prøvene kan det påføres effekt i heatertråden som er lagt rundt prøveholderen eller kaldhodet.

Måling av tap ble gjort ved å påføre et gitt vekslende magnetfelt ved Δt_{AC} på henholdsvis 30 s og 15 s. 15 sekunders måletid ble brukt når motstanden til kobbertermometeret rundt en prøve økte med mer enn 10 % under målinger gjort ved $\Delta t_{AC} = 30$ s. Dette ble gjort for å hindre eventuelle målefeil som kan oppstå. Dette oppstod i lengdene på 12 mm, 29 mm og 50 mm.

Kalibrering må gjøres for hver enkelt leder på de temperaturer målingene blir utført. Fordi forholdene ikke er adiabatisk har man valgt at $\Delta t_{AC} = \Delta t_{cal}$. Etter at feltmålingene ved en gitt temperatur var utført, ble kalibreringsmåling gjort ved å påføre kjent effekt i heaterene som er tvunnet rundt MgB₂-prøvene for samtidig å måle temperaturstigning ved hjelp av kobbertermometeret som også er tvunnet rundt MgB₂-prøvene. På de korteste lengdene, dvs. 3 mm, 3 mm, 4 mm og 7 mm, ble kalibrering gjort med en $\Delta t_{cal} = \Delta t_{AC} = 30$ s. På de lengste lengdene, dvs. 12 mm, 29 mm og 50 mm, ble to kalibreringer gjort, det vil si for $\Delta t_{cal} = \Delta t_{AC} = 15$ s og $\Delta t_{cal} = \Delta t_{AC} = 30$ s.

Målingsrunde 1-3 ble utført ved 50 Hz og et påført magnetfelt på mellom 50 mT og 210 mT. I den første målingsrunden har vakuumkryostaten den lavest mulige temperaturen, ved den andre målingsrunden noe høyere og den tredje målingsrunden har den høyeste temperaturen.

Målingsrunde 4-6 ble utført ved en fast temperatur og et magnetfelt med frekvens mellom 15 Hz og 260 Hz. Den fjerde målingsrunden hadde påført magnetfelt på 75 mT, den femte målingsrunden hadde påført magnetfelt på 100 mT og den tredje et påført magnetfelt på 125 mT.



5. Resultat

5.1 Målingsrunde 1-3

I del 1 ble det utført tre målingsrunder på 50 Hz hvor hver av målingsrundene hadde ulik temperatur og hvor det påførte magnetfeltet var fra 50 mT til 210 mT.

Målingsrunde 1

Resultatene fra første målingsrunde er vist i Figur 5.1. Den ble utført ved den laveste temperaturen MgB₂-prøvene klarte å oppnå i vakuumkryostaten. Temperaturen til de ulike prøvene varierte noe i forhold til hverandre, hvor prøven med lavest starttemperatur var 29,4 K (50 mm), mens prøven med høyest starttemperatur 31,7 K (12 mm). De ulike temperaturene til prøvelengdene er skrevet i Figur 5.2. I denne målingsrunden ble det kun gjort 3 målinger ved 3 ulike magnetfelt på mellom 126 mT og 160 mT ved 50 Hz. Årsaken til at flere målinger ikke ble utført ved denne temperaturen var fordi MgB₂-prøvene ikke oppnådde like lav temperaturen etter at alt utstyret måtte flyttes.

Målingsrunde 2

Resultatene fra andre målingsrunde er vist i Figur 5.2. Den ble utført ved en litt høyere starttemperatur på prøvene enn målingsrunde en. Prøven med lavest starttemperatur var 30,68 K (50 mm) og høyest var 35,1 K (7 mm). De ulike temperaturene til prøvelengdene er skrevet i Figur 5.2. I denne målingsrunden ble det utført 7 målinger med 7 ulike magnetfelt på mellom 50 mT og 210 mT ved 50 Hz. Dette er den eneste målingsrunden hvor 7 mm er representert. Dette er fordi spenningsmålingen til kobbertermometeret til prøven på 7 mm var ustabil, og det var kun mulig å få ut greie måleresultater i andre og tredje målingsrunde. Ved tredje målingsrunden var temperaturen over 37 K som vil si at dens temperatur var høyere enn MgB₂s kritiske temperatur og er derfor ikke tatt med.

Målingsrunde 3

Resultatene fra tredje målingsrunde er vist i Figur 5.3. Den ble utført ved den høyeste starttemperatur det ble utført målinger ved. Prøven med lavest starttemperatur var 33,1 K (50 mm) og høyest var 35,8 K (12 mm). De ulike temperaturene til prøvelengdene er skrevet i Figur 5.3. I denne målingsrunden ble det utført 7 målinger med 7 ulike magnetfelt på mellom 50 mT og 210 mT ved 50 Hz.

Sammenligning av resultater målingsrunde 1-3.

Måleresultatene fra målingsrunde 1 til 3 er vist i Figur 5.1 til 5.3. Ved å sammenligne disse plottene med hverandre ser man tydelig at dess høyere starttemperatur prøvene har, dess lavere tap er det i prøvene. Det kan også sees at tapene øker ved økende påført magnetfelt. I disse plottene har prøvene ulike temperaturer i forhold til hverandre og de ulike prøvelengdene er derfor ikke fullstendig sammenlignbare med hverandre. Derfor har verdier blitt interpolert mellom to temperaturer for å få ut måleverdier ved henholdsvis 31 K, 33 K og 35 K. I tillegg har en verdi blitt ekstrapolert. Figur 5.4 viser plott for verdier ved 31 K, Figur 5.5 viser plott for verdier ved 33 K og Figur 5.6 viser plott for verdier ved 35 K.

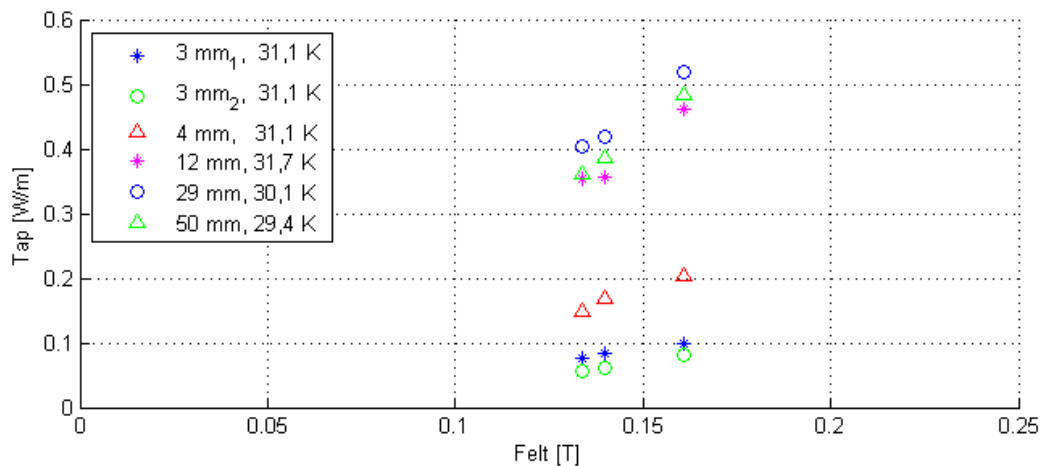
I Figur 5.4 til 5.6 har prøvene på 3 mm lavest tap og er tilsvarende. Deretter stiger tapene dess lenger prøvelengden er til lengder opptil 12 mm. Ved lave påførte vekselfelt har 12 mm, 29 mm og 50 mm tilsvarende like tap. Ved høyere påført magnetfelt, ved 125 mT og over, ser det ut til at 12 mm får høyere tap enn 29 mm, og at 29 mm får høyere tap enn 50 mm.

Figur 5.7 og 5.8 er laget ved hjelp av interpolering mellom to punkter fra Figur 5.4 til 5.6.

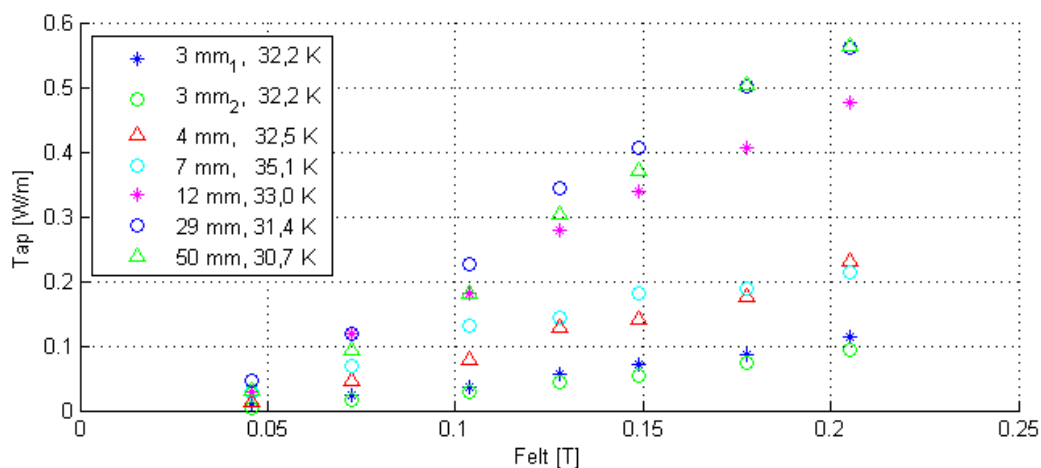
Figur 5.10 viser tap som funksjon av lengde ved 35 K ved ulike magnetfelt. Her er det tydelig hvordan tapet øker med økende lengde ved lengde opptil 12 mm. Her kan man se 29 mm har noe lavere tap enn 12 mm ved høye felt på 150 mT og 200 mT. Hadde tapene for 50 mm vært med ville den vist enda lavere tap enn 12 mm og 29 mm. Det vises også tydelig at tapet øker med økende magnetfelt.

Figur 5.11 viser tap som funksjon av lengde med påført magnetfelt på 150 mT ved henholdsvis 31 K, 33 K og 35 K. Her kommer det tydelig fram hvordan tapet øker med økende lengde ved lengder opptil 12 mm. Ved alle temperaturer vises det at 29 mm har lavere tap enn 12 mm ved 150 mT. Det vises også tydelig tapet øker med økende magnetfelt.

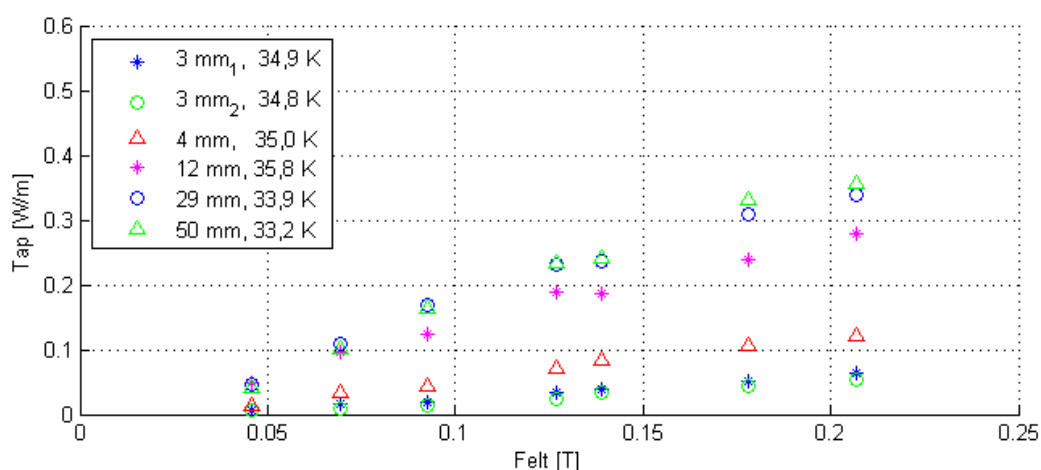
5.1.1 Resultater



Figur 5.1. Målingsrunde 1, lav temperatur. Plottet viser tap som en funksjon av påført magnetfelt.

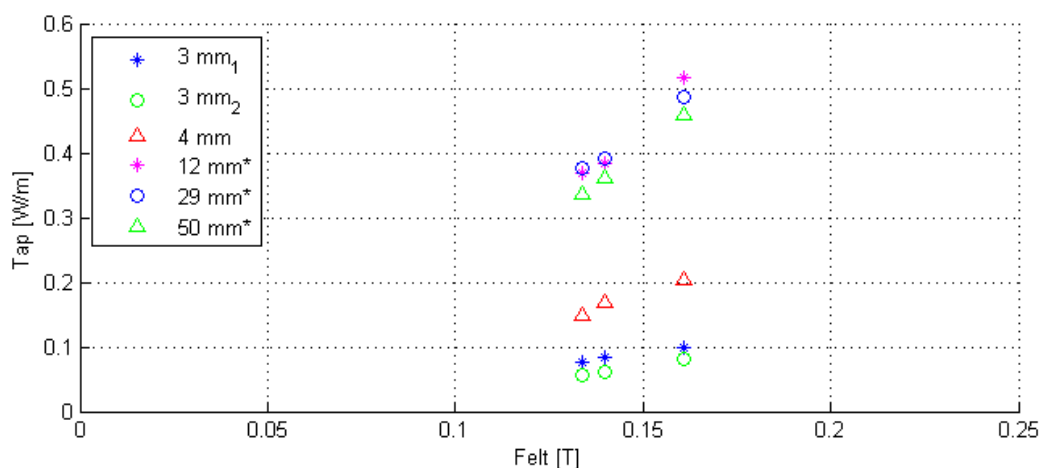


Figur 5.2. Målingsrunde 2, mellomtemperatur. Plottet viser tap som en funksjon av påført magnetfelt.

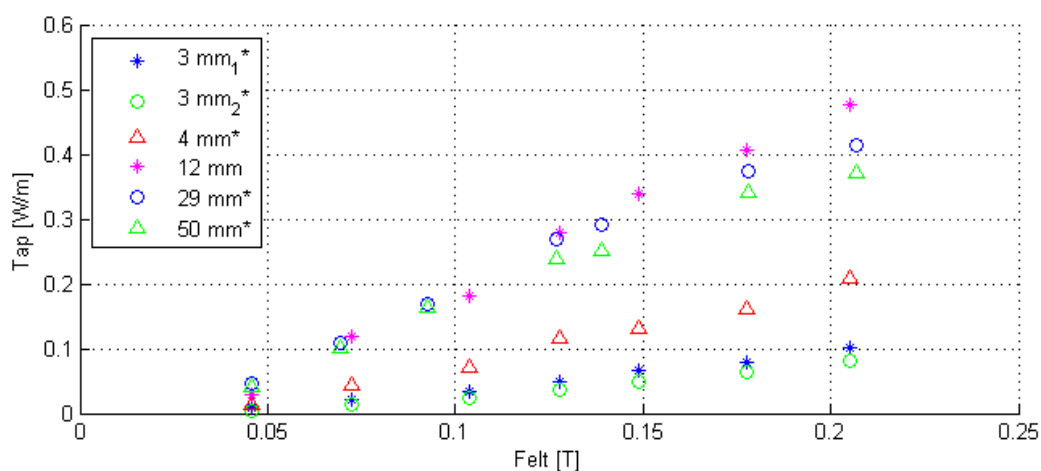


Figur 5.3. Målingsrunde 3, høy temperatur. Plottet viser tap som en funksjon av påført magnetfelt.

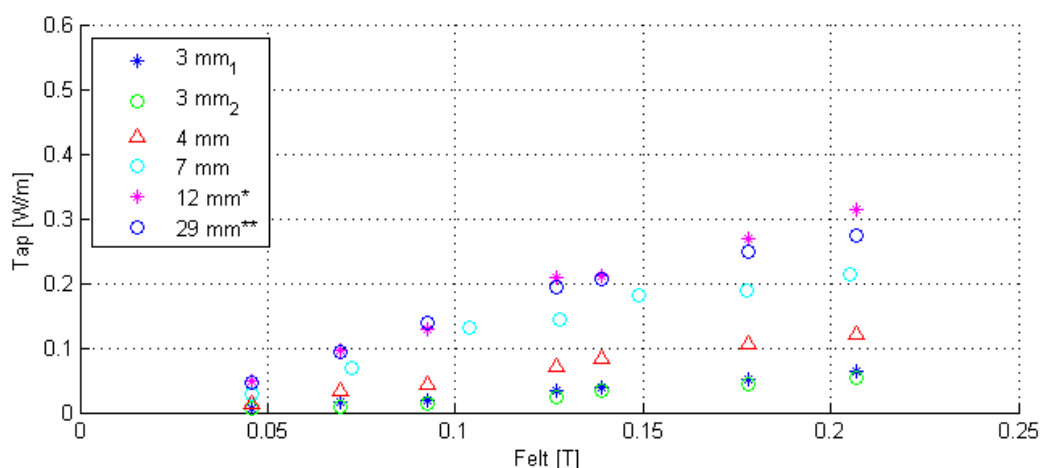
5.1.2 Resultater med interpolerte og ekstrapolerte verdier



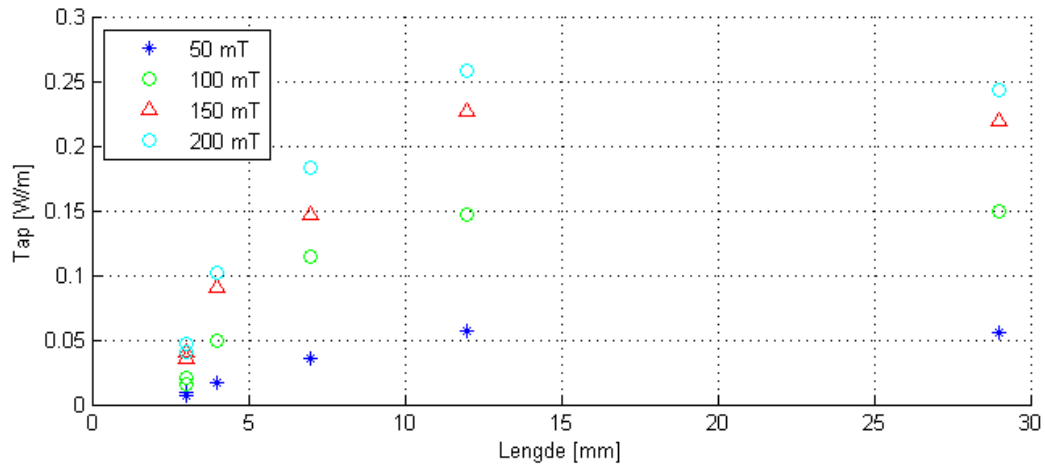
Figur 5.4. Plottet viser tap som funksjon av påført magnetfelt ved 31 K. Verdier med * vil si interpolerte verdier.



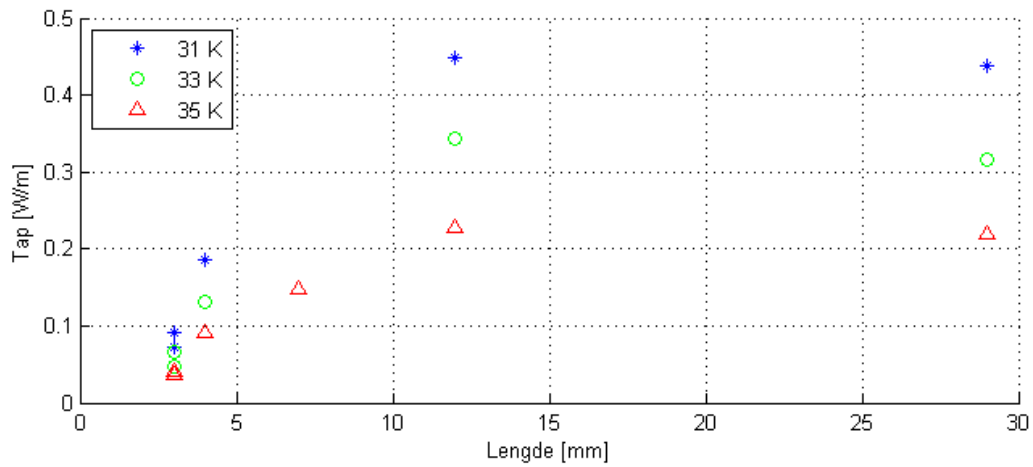
Figur 5.5. Plottet viser tap som funksjon av påført magnetfelt ved 33 K. Verdier med * vil si interpolerte verdier.



Figur 5.6. Plottet viser tap som funksjon av påført magnetfelt ved 35 K. Verdier med * vil si interpolerte verdier mens verdier med ** vil si ekstrapolerte verdier.



Figur 5.7. Tap som funksjon av lengde ved 35 K. Det påførte magnetfeltet er på 50, 100, 150 og 200 mT. Verdiene i dette plottet er funnet ved interpolering mellom to punkter fra Figur 5.6.



Figur 5.8. Plottet viser tap som funksjon av lengde ved 150 mT. Verdiene i dette plottet er funnet ved interpolering mellom to punkter fra Figur 5.4-5.6.

5.2 Målingsrunde 4-6

I Del 2 ble det utført tre målingsrunder hvor alle målingsrundene hadde samme temperatur som ved målingsrunde 2. Verdier for 50 Hz ble hentet ut fra målingsrunde 3 ved hjelp av interpolasjon mellom to punkter.

Det ble ikke gjort en egen kalibrering for Del 2, noe som kanskje burde ha blitt gjort da vakuumbrystaten har blitt oppvarmet og nedkjølt igjen siden målingene i Del 1 ble gjort.

Målingsrunde 4

Resultatene til fjerde målingsrunde er vist i Figur 5.9. Det påførte magnetfeltet lå på 75 mT. Det ble gjort 9 målinger hvor magnetfeltet hadde en frekvens mellom 15 og 260 Hz.

Målingsrunde 5

Resultatene til femte målingsrunde er vist i Figur 5.10. Det påførte magnetfeltet lå på 125 mT. Det ble gjort 7 målinger hvor magnetfeltet hadde en frekvens mellom 15 og 210 Hz.

Målingsrunde 6

Resultatene til sjette målingsrunde er vist i Figur 5.11. Det påførte magnetfeltet lå på 125 mT. Det ble gjort 5 målinger hvor magnetfeltet hadde en frekvens mellom 75 og 180 Hz.

Ved høye og lave frekvenser ble det vanskelig å få tilstrekkelig strøm til feltspolene til å gjøre målinger med høye felt. Ved lave frekvenser kan det være fordi transformatorene i kretsen blir mettet.

Sammenligning av resultater målingsrunde 4-6.

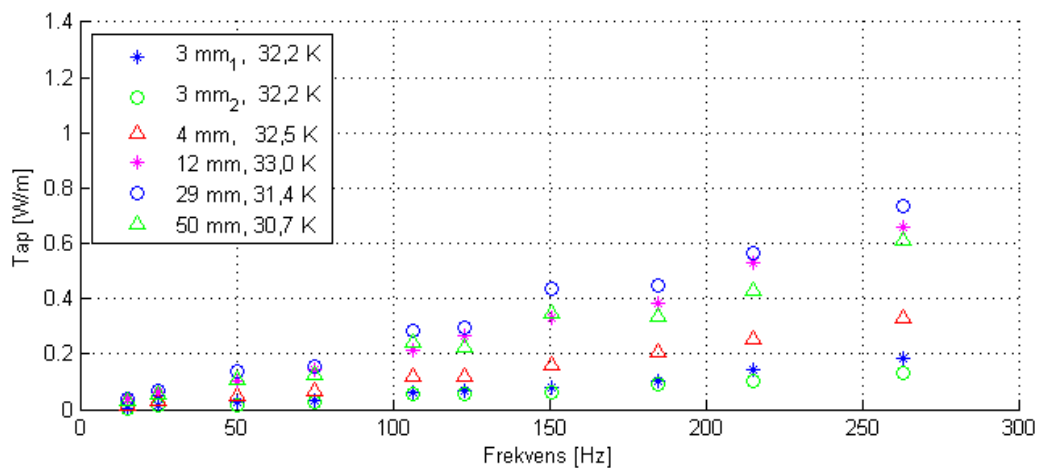
Måleresultatene fra målingsrunde 4-6 er vist i Figur 5.94 til 115.6. Ved å sammenligne disse plottene med hverandre ser man som fra målingsrunde 1 til 3 at dess høyere påført magnetfelt, dess høyere tap. I tillegg kan man se at tapene øker med økende frekvens.

Figur 5.12 viser tap per syklus som en funksjon av frekvens for den ene 3 mm-prøven. Figur 5.13 til 5.18 viser tilsvarende plott for resten av lengdene.

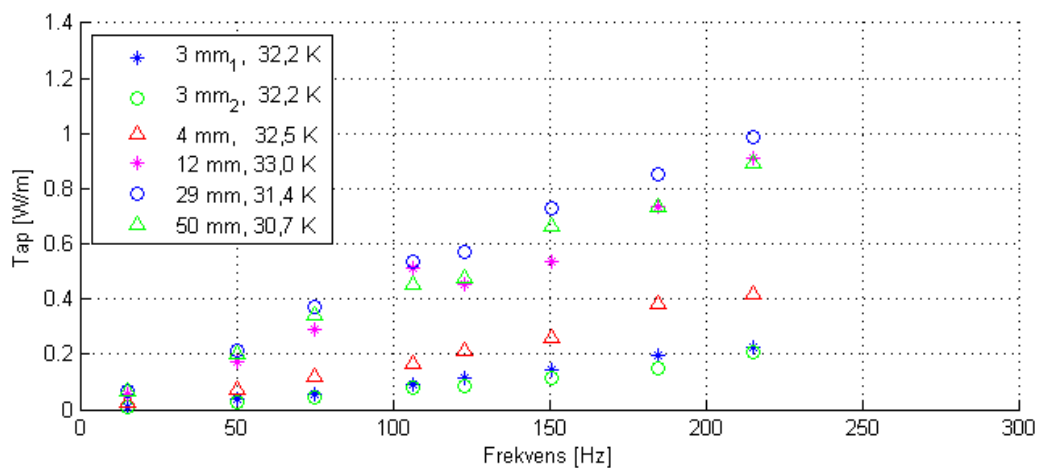
Figur 5.12 til 5.14 viser at tap per syklus stiger ved økende frekvens for prøver på 3 mm og 4 mm. Tap per syklus stiger også ved økende påført magnetfelt.

Figur 5.15 til 5.17 viser tap per syklus for prøver med lengde på henholdsvis 12 mm, 29 mm og 50 mm. Ved disse lengdene er det tilsvarende konstant tap per syklus ved økende frekvens ved påført magnetfelt på 75 mT og 100 mT. Ved 125 mT kan de se ut til at det er en økning i tap per syklus ved økende frekvens. De tre lengdene har noe forskjellig verdi på tap per syklus, noe av forskjellen her kan skyldes ulik temperatur på prøvene.

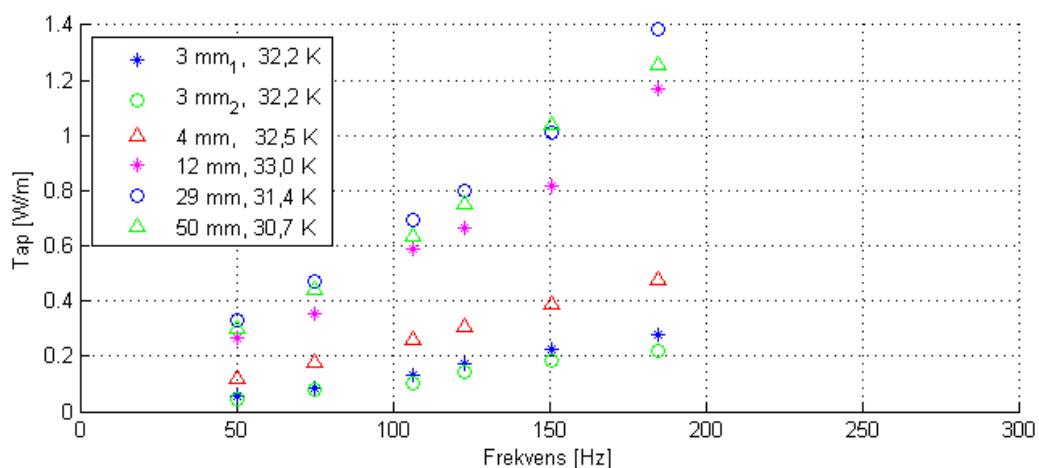
5.2.1 Resultater



Figur 5.9. Målingsrunde 4, B=75 mT. Plottet viser tap som funksjon av frekvens.

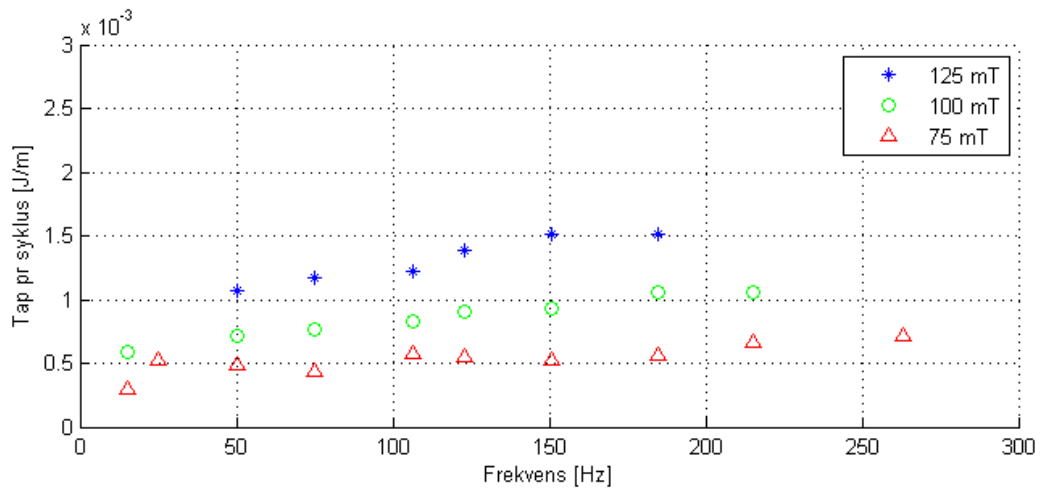


Figur 5.10. Målingsrunde 5, B=100 mT. Plottet viser tap som funksjon av frekvens.

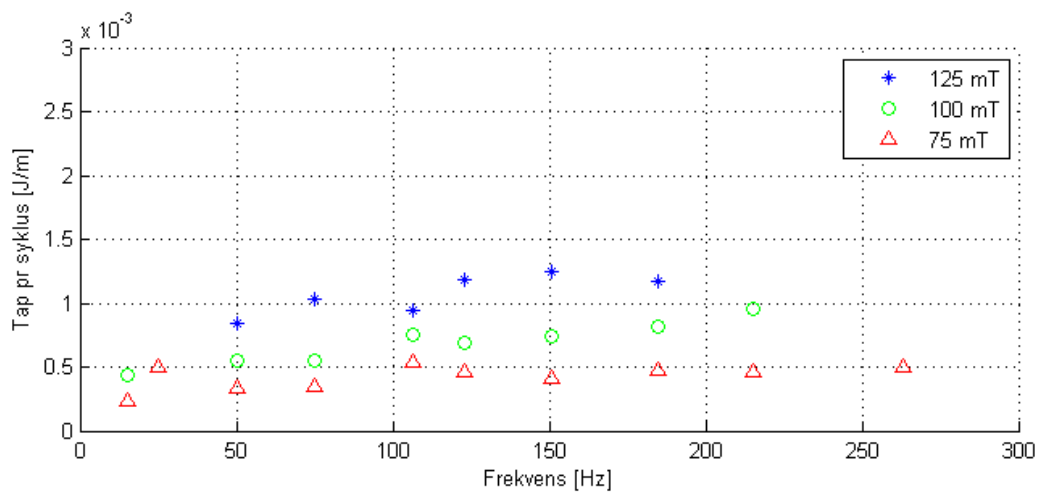


Figur 5.11. Målingsrunde 6, B=125 mT. Plottet viser tap som funksjon av frekvens.

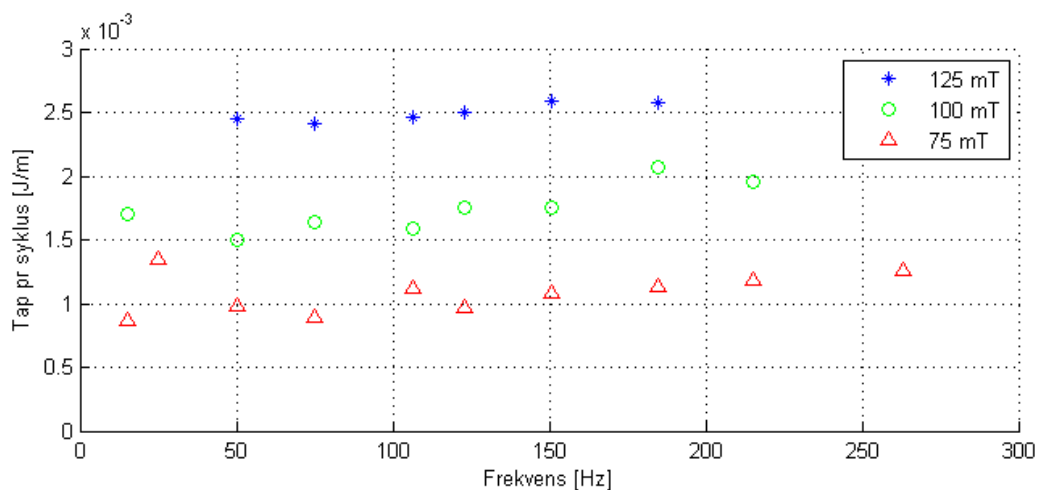
Figur 4.3: Critical current vs. temperature in Sample 1. The measured values and calculations are shown in Appendix I.



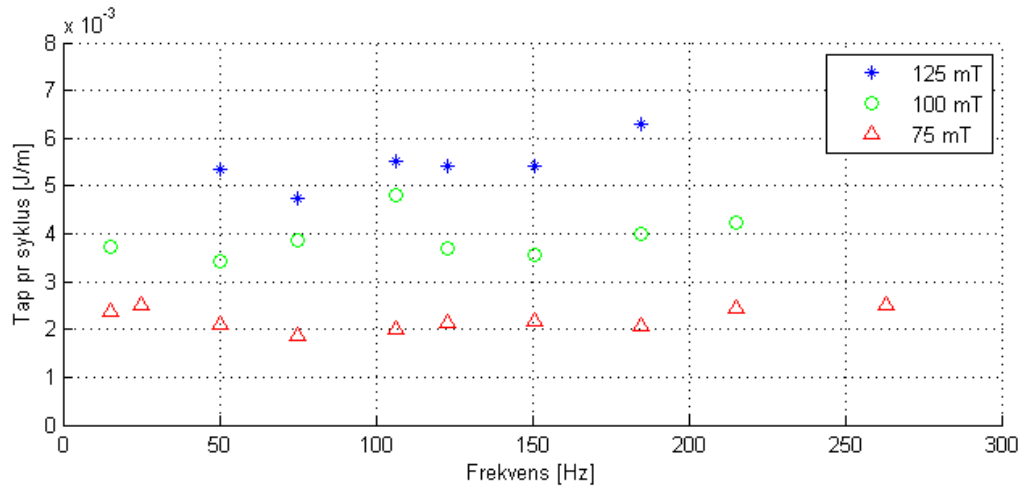
Figur 5.12. Lengde 3 mm ved 32,2 K. Plottet viser tap per syklus som funksjon av frekvens.



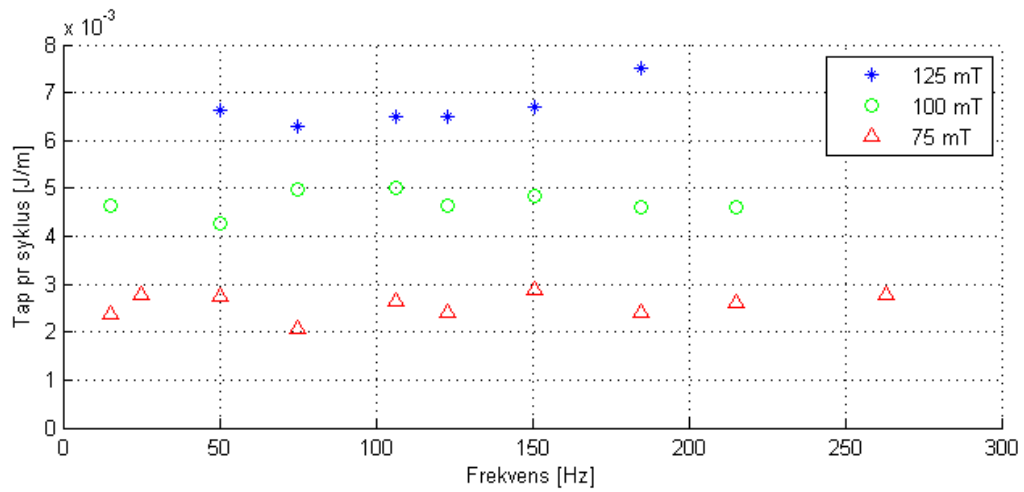
Figur 5.13. Lengde 3 mm ved 32,2 K. Plottet viser tap per syklus som funksjon av frekvens.



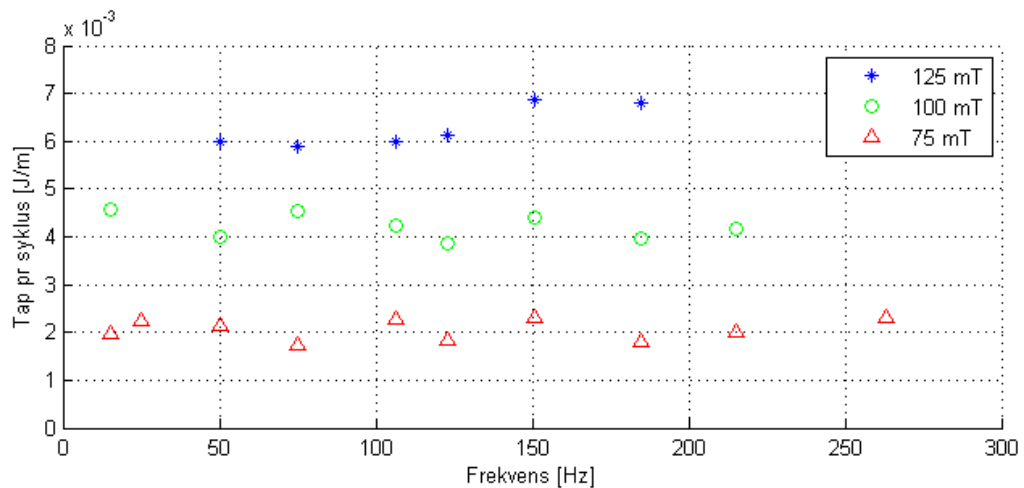
Figur 5.14. Lengde 4 mm. 32,5 K. Plottet viser tap per syklus som funksjon av frekvens.



Figur 5.15. Lengde 12 mm ved 33,0 K. Plottet viser tap per syklus som funksjon av frekvens.



Figur 5.16. Lengde 29 mm ved 31,4 K. Plottet viser tap per syklus som funksjon av frekvens.



Figur 5.17. Lengde 50 mm ved 30,7 K. Plottet viser tap per syklus som funksjon av frekvens.

5.3 Hysteresetap

Ved å kombinere (2.10) og (2.11) får man forholdet mellom en leder som er fullt koblet og ikke fullt koblet lik

$$\frac{P_{koblet}}{P_{dekoblet}} = \frac{R_{koblet}}{R_{fil}} \quad (5.1)$$

Hvor R_{fil} er radiusen til et superledende filament i Prøve 1 og R er den effektive hystereseradiusen til Prøve 1 når den er fullt koblet.

Fra Figur 2.X kan man se at forholdet mellom diameteren til Prøve 1 og den effektive diameteren til Prøve 1 når den er fullt koblet lik $C=0,67$. Ved hjelp av informasjonen om Prøve 1 i avsnitt 3.1 finner vi

$$R_{koblet} = C \times \frac{d_{leder}}{2} = 0,67 \times \frac{1,14 \text{ mm}}{2} = 0,380 \text{ mm} \quad (5.2)$$

Fra (4.3) får vi at

$$R_{fil} = \frac{d_{fil}}{2} = \frac{1,294 \times 10^{-4} \text{ m}}{2} = 6,470 \times 10^{-5} \text{ m} \quad (5.3)$$

Dette gir

$$\frac{P_{koblet}}{P_{dekoblet}} = \frac{0,380 \times 10^{-3} \text{ m}}{6,470 \times 10^{-5} \text{ m}} = 5,87 \quad (5.4)$$

Som vil si at hysteresetapet når Prøve 1 er fullt koblet vil teoretiske sett være 5,87 ganger større enn når den ikke er fullt koblet.

5.4 Virvelstrømstap

Det teoretiske virvelstrømstapet i matriksen i Prøve 1 er, som er av titan, kan regnes ut. I (2.12) står det at virvelstrømstap for ledere bestående av et homogent materiale er

$$P = \frac{\Pi^2 d_{titan}^2 B_a^2 f^2 A_{titan}}{6k \rho_{m,35K}} \quad (5.5)$$

Da Prøve 1 i tillegg har superledende filamenter av MgB₂ velges det å regne ut hvilket areal og diameter Prøve 1 ville hatt uten MgB₂.

Fra kapittel 3.1 får vi informasjon om arealet til Prøve 1 og hvor stort arealet av MgB₂ det er i prøven. Det gir

$$A_{Titan} = A_{Prøve1} - A_{MgB_2} = (1,01 - 0,25) \text{ mm}^2 = 0,76 \text{ mm}^2 \quad (5.6)$$

$$d_{titan} = \sqrt{\frac{A_{Titan}}{\pi}} = \sqrt{\frac{0,76 \text{ mm}^2}{\pi}} = 0,492 \text{ mm} \quad (5.7)$$

Det påsatte magnetfeltet og frekvensen i dette regnestykket er $B_a = 100 \text{ mT}$ og $f = 50 \text{ Hz}$. Fra (4.8) får vi at den spesifikke motstanden i titan ved 35 K er $\rho_{,35K} = 0,6334 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$.

Dette gir

$$P = \frac{\Pi^2 (0,492 \times 10^{-3} \text{ m})^2 \times (100 \times 10^{-3} \text{ T})^2 \times (50 \text{ Hz})^2 \times (0,76 \times 10^{-6} \text{ m})}{6 \times 2 \times 0,6334 \times 10^{-7} \Omega\text{m}} = 18,15 \mu\text{W/m} \quad (5.8)$$

Virvelstrømmene i titanen i Prøve 1 vil teoretisk sett føre til et tap på 18,15 μW/m og er derfor neglisjerbart i forhold til de målte tapene.

6. Diskusjon

6.1 Sammenligning av resultater

Temperatur

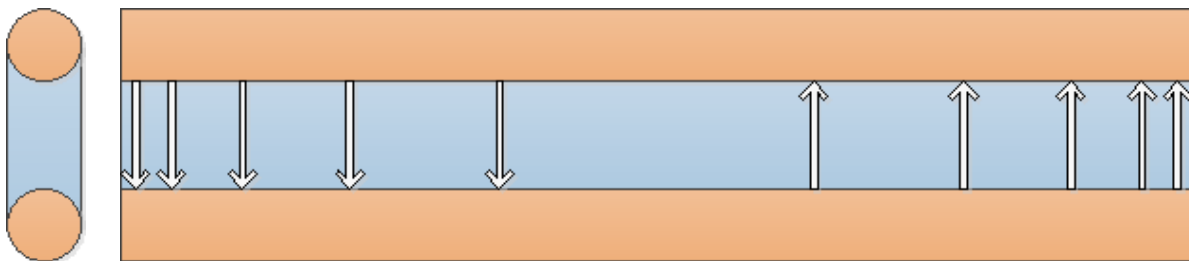
Resultatene viser at dess høyere starttemperatur en prøve har ved måling, dess lavere tap vil oppstå i prøven. Dette er en naturlig respons da høyere temperatur fører til lavere kritisk strøm I_c . Figur 5.11 viser dette på en god måte.

Magnetfelt

Når man øker magnetfeltet øker tapet i lederne. Fra Figur 5.5, ved magnetfelt over 125 mT, kan det se ut til at tapene for 12 mm øker mer enn for 29 mm og 50 mm. Dette kan tyde på at det er koblingsstrømstap i lederne som måles på. Grunnen til dette er fordi ved lengre prøvelengde har koblingsstrømmene et større område de kan krysse over matriksen på. Denne forskjellen i tap vil stige fram til 12 mm-prøven har nådd kritisk lengde og opplever full kobling. Ved full kobling vil koblingsstrømmene være tilnærmet konstante selv ved økende påført vekslende magnetfelt. Dette er fordi maks koblingsstrøm er like store som kritisk strøm, I_c . Ligning (6.1) viser hvordan resistansen til koblingsstrømmen synker ved økende lengde på ledere.

$$R_{\text{koblingsstrøm}} = \frac{l}{A} \rho_{\text{matrise}} \quad (6.1)$$

A er tverrsnittsarealet for hvor koblingsstrømmen går fra et filament til et annet, som illustrert i Figur 6.1 (a), l [m] er lengden til prøven og ρ_{matrise} er den spesifikke motstanden [Ωm] til matriksen.



Figur 6.1. (a) viser et forenklet tverrsnitt for en leder hvor rundingene representerer filamentene og det blå området representerer området i matriksen hvor koblingsstrømmene krysser. (b) viser et langsgående snitt av ledere. Pilene representerer koblingsstrømmene som går over matriksen mellom filamentene når feltet er orientert inn i tegningen.

Frekvens

For 3 mm, 3 mm og 4 mm, i Figur 5.12 til 5.14, øker tap per syklus ved økende frekvens. Grunnen til dette kan være fordi ved økende frekvens synker kritisk lengde, som fører til at mer koblingsstrøm går over matriksen. Filamentene blir da i større grad elektromagnetisk koblet sammen som fører til større hysteretap. Noe av tapene skyldes også økte koblingsstrømmer, men ut fra plottene i Figur 5.12 til 5.14 ser man at tapene ikke er proporsjonalt stigende med kvadratet av frekvensen, som da ville være forventet.

For 12 mm, 29 mm og 50 mm, i Figur 5.15 til 5.17, øker tap per syklus tilnærmet ingenting ved økende frekvens ved 75 mT og 100 mT. Dette kan være fordi disse lengdene er ganske nær eller allerede er over kritisk lengde og derfor fullt koblet. Det kan se ut til at det er en liten økning av tap per syklus ved økende frekvens ved 125 mT.

Årsaken til at koblingstapene ikke er så fremtredende i disse målingene i forhold til målingene utført av Kováč, Šouc og Kováč (2012) kan være på grunn av forskjeller i oppbygging av lederen: plassering av de superledende filamentene og valg av materiale rundt superlederfilamentene.

Figur 5.15 til 5.17 viser tap per syklus for prøver med lengde på henholdsvis 12 mm, 29 mm og 50 mm. Ved disse lengdene er det tilsvarende konstant tap per syklus ved økende frekvens ved påført magnetfelt på 75 mT og 100 mT. Det vil si at tapet øker lineært med økende frekvens, slik som hysterese-tapet vil oppføre seg i en leder som er fullt koblet. Fra dette kan man anta at både 12 mm, 29 mm og 50 mm er over kritisk lengde. Men ved 125 mT kan det se ut til at det er en økning i tap per syklus ved økende frekvens. Fra resultatene med påført magnetfelt på 75 mT og 100 mT som er utført ved flere frekvenser er det stor grunn til å tro at dette skyldes tilfeldigheter og at om man hadde utført flere målinger ved flere frekvenser for 125 mT ville også målingene ved 125 mT vise et konstant tap per syklus ved økende frekvens.

Om man antar, ved å se på målingene ved 75 mT og 100 mT i Figur 5.15 til 5.17, at lengdene har oppnådd full kobling ved disse påført magnetfeltene, stemmer ikke forklaringen om at tapene for 12 mm i Figur 5.5 stiger mer enn for 29 mm og 50 mm på grunn av økte koblingsstrømstap. Videre kan det diskuteres om det da er andre tap som oppstår ved felt over 125 mT.

Lengde

Samtlige målinger viser at de to prøvene på 3 mm har lavest tap, deretter stiger tapene i de målte lengdene opp til 12 mm. Ved lave magnetfelt under 125 mT er tapene til 12 mm, 29 mm og 50 mm tilsvarende like. Ved høyere magnetfelt ser det ut til at 12 mm får høyere tap enn 29 mm, og 29 mm får høyere tapp enn 50 mm.

Ved 50 Hz og 100 mT er differansen på tapet mellom 3 mm og 24 mm omtrent på en faktor 6. Den teoretiske forskjellen i hysterese-tap i Prøve 1 når den er ikke-koblet og er fullt koblet fra (5.4) er på en faktor 5,87. Dette viser at ved 50 Hz og 100 mT vil prøven få tilnærmet maksimalt utbytte av tvinningen med en slaglende på 6 mm.

Ved å sammenligne målingsresultatene med Figur 4.1 og 4.2 var det forventet å se en større variasjon av kritisk lengde ved ulike magnetfelt og frekvens. Det er mulig at ved flere målinger av 7 mm kunne man sett flere slike variasjoner, men dessverre ga 7 mm kun resultater til en måling. Fra Figur 4.1 og 4.2 viser at ved $B_a = 75$ mT og $f = 15$ Hz vil den teoretiske kritiske lengden være på 70 mm, altså kunne det være forventet at man tydelig kan se at 12 mm er under kritisk lengde. Men ut i fra Figur 5.15 vises ikke dette. Men som man ser i Figur 3.1 (a) har ikke superlederen perfekte runde filamenter. I tillegg er verdiene som er anvendt for utregning for kritisk lengde estimerte verdier og verdien for kritisk strøm er innhentet ved 35 K. Ut fra dette kan man anta en lavere kritisk lengde.



6.2 Feilkilder

Det kan være flere feilkilder

- Fra vedlegg II får vi at for tester med temperaturer under 35 K har variasjoner i motstand innenfor samme kobberspole blitt sett.
- Mekanisk og elektrisk skade i filamentene etter kutting og sliping.
- Unøyaktigheter fra resultatene i Data logger.
- For høye eller for lave felt fra spolene. Dette var ikke alltid lett å gjøre like nøyaktig.

For videre arbeid kan man gjøre målinger ved flere lengder og utføre målinger ved høyere påsatt magnetfelt. Neste naturlige steg vil deretter være å gjøre AC-tapmålinger på tvunnete superledere.

7. Konklusjon

Det har blitt utført AC-tapsmålinger på totalt 7 ulike lengder av en rund MgB₂-leder. Disse målingene har blitt utført ved å påføre et vekslende magnetfelt ved ulike styrker og frekvenser ved tre ulike temperaturer. Det ble kun utført en måling på den 7 mm lange prøven.

Resultatene til målingene som er utført viser at:

- tapene i prøvene øker ved lavere temperaturer, økende magnetfelt og økende frekvens.
- tap per syklus øker ved økende frekvens i prøvene på 3 mm, 3 mm og 4 mm, mens tap per syklus i prøvene på 12 mm, 29 mm og 50 mm er stabile. At tap per syklus hos 12 mm, 29 mm og 50 mm er stabile ved økende frekvens kan tyde på at koblingsstrømmene er fullt koblet.
- Når prøvene er 35 K øker tapene dess lenger prøvene er for prøvene 3 mm, 3 mm, 4 mm, 7 mm og 12 mm. Man kan også se tilsvarende resultater for målinger utført ved 31 K og 33 K, da med målinger uten 7 mm. At 12 mm, 29 mm og 50 mm har tilsvarende like høye tap ved like temperaturer tyder på at disse prøvene er nær eller over kritisk lengde.
- man har grunnlag for å tro at størstedelen av tapene vi ser i Prøve 1 ikke er grunnet koblingstrømstap, men hysterestap. Dette er fordi tapene ikke er lineære med kvadraten av frekvensen.
- AC-tapene ved 50 Hz og 100 mT minsker med cirka en faktor 6 ved å redusere prøvelengden fra 12 mm, 29 mm eller 50 mm til 3 mm. Det vil si at man kan anta at ved å redusere slaglengden i en lang prøve fra 24 mm til 6 mm får man tilnærmet maksimalt utbytte av å tvinne prøven.



8. Forslag til videre arbeid

For videre arbeid kan man gjøre målinger ved flere lengder og utføre målinger ved høyere påsatt magnetfelt. Neste naturlige steg vil deretter være å gjøre AC-tapmålinger på tvunnede superledere.

Referanser

- Averill, B. and Eldredge P., 2006. *Chemistry: Principles, Patterns, and Applications*. Prentice Hall
- Ciszek, M., Campbell, A. M., Ashworth, S. P. and Glowacki, B. A., 1995. Energy dissipation in high temperature ceramic superconductors. *Applied Superconductivity*, vol. 3, no. 7-10, pp. 509-520.
- Eck, J., n.d. *Superconductor*. [online] Available at: <<http://superconductors.org/INdex.htm>> [Accessed 10 December 2012]
- Fiorillo, F., 2004. *Characterization and Measurement of Magnetic Materials*. Academic Press.
- Fausto Fiorillo
- Fossheim, K., editor., 1991. *Superconduction Technology. 10 case studies*. World Scientific Publishing.
- Fossheim, K. and Sudbø A., 2004. *Superconductivity: Physics and Applications*. Wiley
- Glowacki, B. A., 1999. Niobium aluminide as a source of high-current superconductors. *Intermetallics*, col 7, no 2, pp. 117-140
- Kováč, J., Šouc, J. and Kováč, P., 2012. Experimental study of the AC magnetization loss in MgB₂ superconducting wires at different temperatures. *Physica C* 475 (2012) 1–4
- Magnusson, N. and Hörnfeldt, S. (1998). Calorimetric apparatus for alternating current loss measurement on high-temperature superconductors. *Rev Sci Instrum.* 1998;69:3320-5
- Magnusson, N., Schönborg, N., Wolfbrandt, A. and Hörnfeldt, S. (2001) Improved experimental set-up for calorimetric AC loss measurement on HTSs carrying transport current in applied magnetic fields at variable temperatures. *Physica C* 2001;354:197-201
- Nagamatsu, J., Nakagawa, N., Muranaka, T., Zenitani, Y. and Akimitsu, J., 2001. *Superconductivity at 39 K in magnesium diboride*. [online] Available at: <<http://www.nature.com/nature/journal/v410/n6824/abs/410063a0.html>>
- Oomen, M., 2000. *AC loss in superconducting tapes and cables*, PhD Thesis, University Twente, the Netherlands
- Taxt, H., 2012. *Apparatus for Calorimetric Measurement of AC Losses in MgB₂ due to Alternating Current and Applied Magnetic Field; AC loss measurement on multi-filamentary MgB₂ wires with non-magnetic sheath material*. Master Thesis, NTNU, Norway.
- Taxt, H., Magnusson, N., Runde, M. and Brisigotti, S., 2012. *AC Loss Measurements on Multi-Filamentary MgB₂ Wires With Non-Magnetic Sheath Materials*. *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, Volume 23, June 2013, 8200204
- Taxt, H., Magnusson, N. and Runde, M., 2012. *Apparatus for Calorimetric Measurements of Losses in MgB₂ Superconductors Exposed to Alternating Currents and External Magnetic Fields*. *Cryogenics* Volume 54, February 2013, Pages 44-49
- Wilson, M. N., 1983. *Superconducting magnets*. Clarendon Press, Oxford, UK.

Vedlegg I

I Figur 3.4 til 3.7 er de ulike prøveoppsettene som ble brukt under målingene. Figur 3.4 viser prøveoppsettet brukt under målingsrunde 1-3 hvor magnetfeltet hadde en fast frekvens på 50 Hz. Figur 3.5 til 3.7 viser prøveoppsett brukt under målingsrunde 4-6 hvor magnetfeltet hadde en frekvens på mellom 15 Hz og 260 Hz.

Spenningskilde

Spenningskilde i Figur 3.4 var 440 V fra veggen.

Spenningskilde i Figur 3.5-3.7 var programmerbar AC-kilde. Denne kan gi ut ulike frekvenser fra 15 Hz.

Transformator 1

Transformator 1 ble brukt for å transformere opp strømmen fra spenningskilden for å få høyere strøm til feltspolene.

Transformator 1 i Figur 3.4 er en sveisettransformator, en såkalt adjustable air-gap transformer.

Transformator 1 i Figur 3.5 til 3.7 bestod av en jernkjerne hvor ledninger manuelt ble tvunnet rundt den. Omformingstallet varierte derfor noe, etter behov.

Transformator 2

Transformator 2 ble brukt for å transformere opp kapasitansen som Kondensator 2 produserer. Kapasitansen er avhengig av kvadratet til omformingstallet.

Transformator 2 bestod av en jernkjerne hvor ledninger manuelt ble tvunnet rundt den. Omformingstallet varierte derfor noe, etter behov.

Kondensator 1

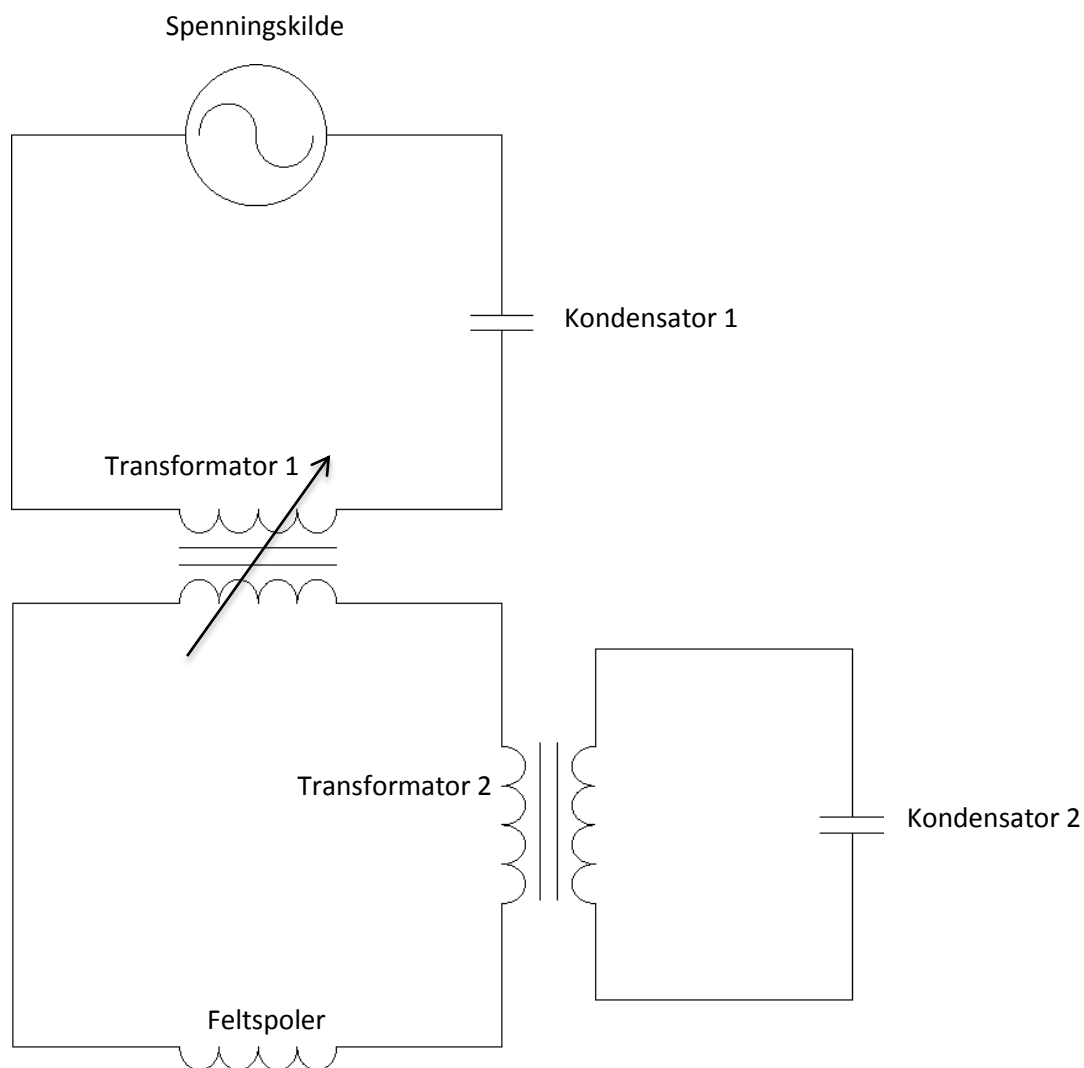
Kondensator 1 ble brukt for å ta bort eventuell likestrømsdel fra spenningskilden.

Kondensator 2

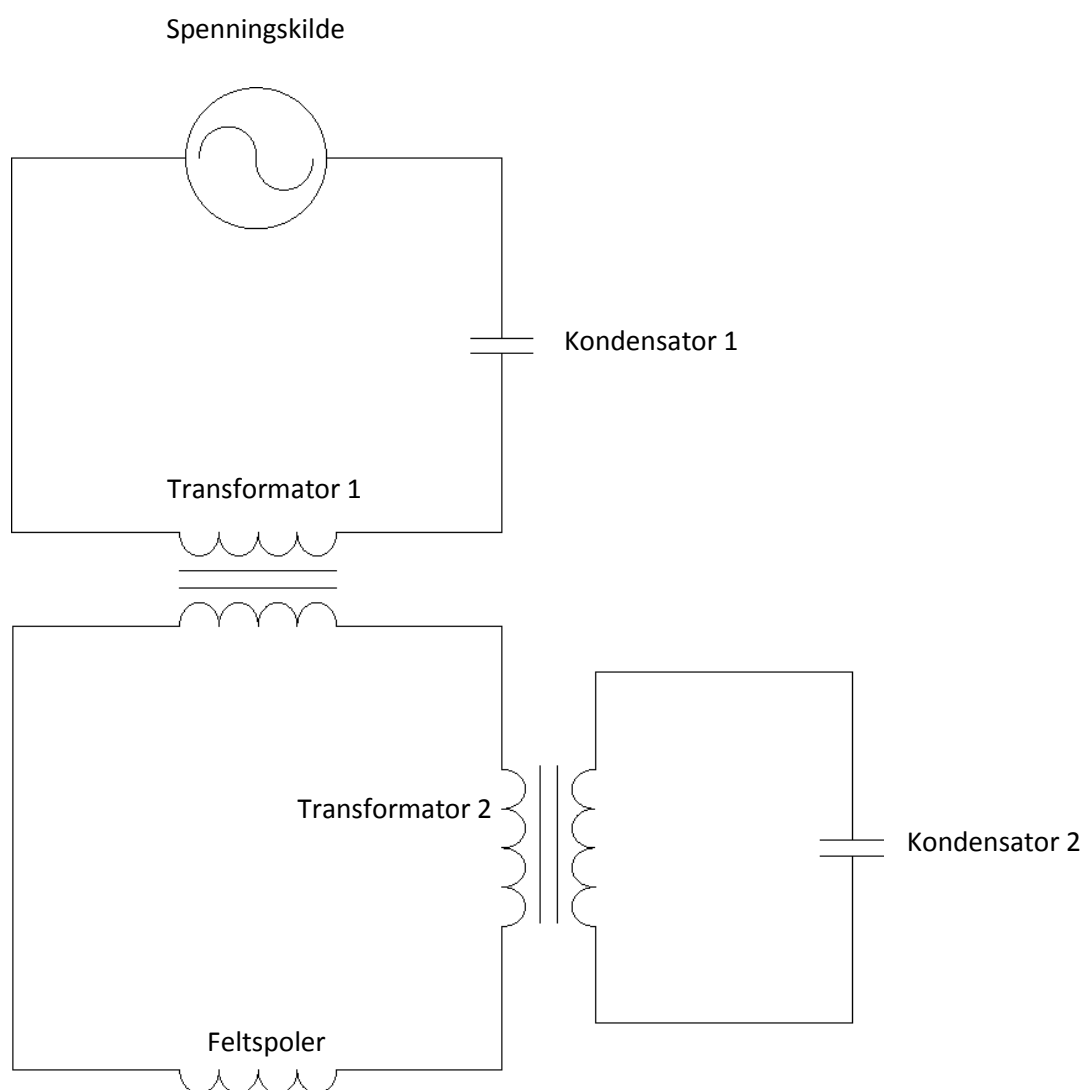
Kondensator 2 ble brukt for å utligne induktansen i systemet som i hovedsak feltspolene produserer. Hvor mange kondensatorer ble brukt ble utregnet før målingene ble utført. Hvor mye kapasitans som må til varierer med frekvens. Kapasitansen som trengs for å utligne induktansen er avhengig av kvadratet av omformingstallet.

Feltspolene

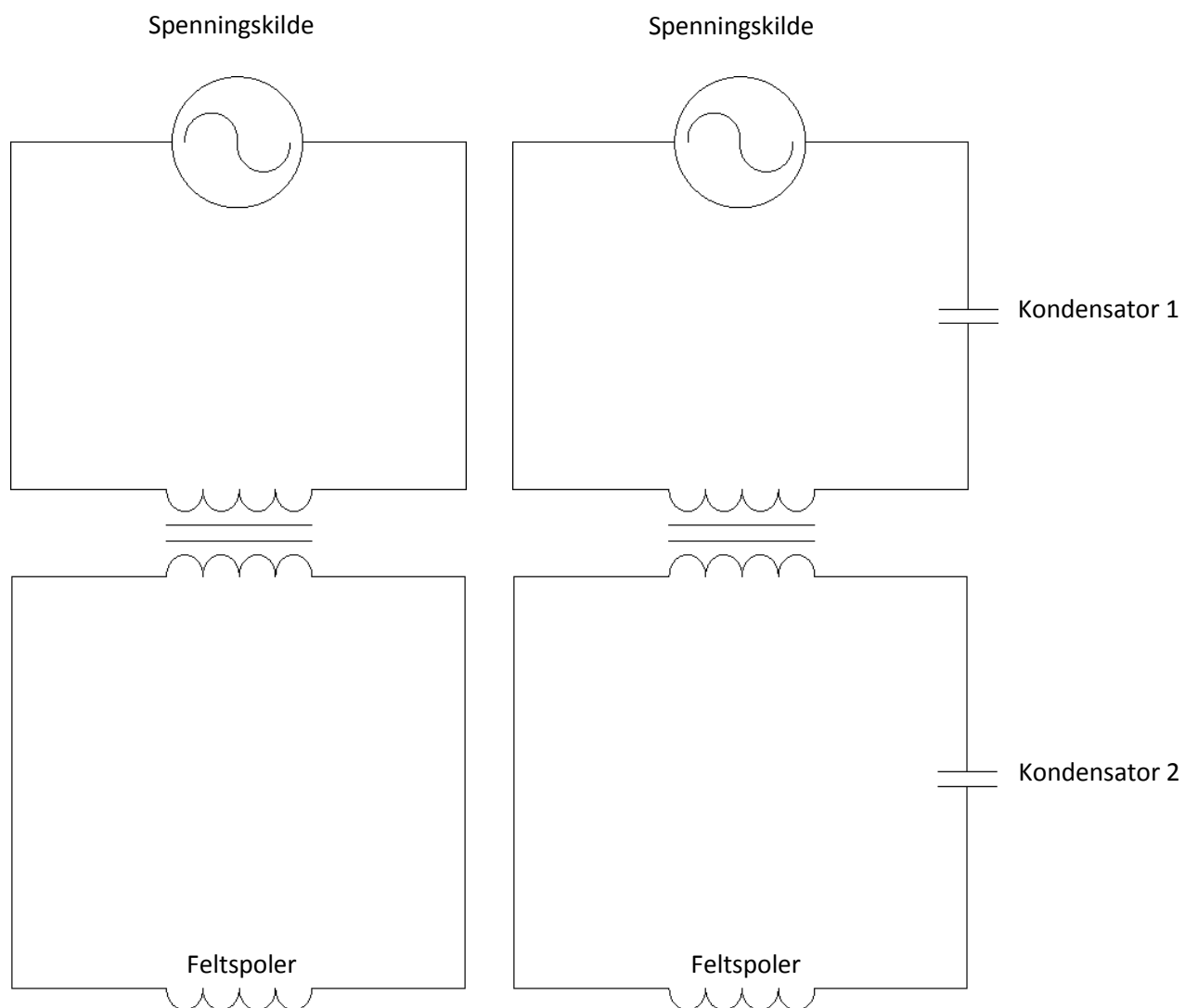
Feltspolene produserer det vekslende magnetfeltet som blir påført MgB₂-prøvene.



Figur 3.4. Oppsett under målingsrunde 1 til 3, målinger med fast frekvens på 50 Hz.



Figur 3.4. Oppsett under målingsrunde 4 til 6, ved målinger med frekvens fra 107 Hz til 260 Hz.



Figur 3.6. (a) Oppsett under målingsrunde 4 til 6, ved målinger med frekvens på 75 Hz. (b) Oppsett under målingsrunde 4 til 6, ved målinger med frekvens på 15 og 25 Hz.

Vedlegg II

Motstandsforholdet for kobbertråden:

Table 2: R/R_0 -verdiene fra 30-40 K er tidligere av Taxt, et. al (2012). R_0 vil si motstand ved 0 °C. Kobbertermometeret brukt i dette prosjektet er fra samme kobbersnelle Taxt har tidligere brukt. Verdiene fra 35-40 K kan med sikkerhet brukt for målinger. For tester med temperaturer under 35 K har variasjoner i motstand innenfor samme kobberspole blitt sett. Verdiene fra 273,16 K og oppover er generelle verdier for kobbertråder med en diameter på 0,1 mm.

T [K]	R/R_0
30	0,141480
31	0,014910
32	0,015747
33	0,016660
34	0,017648
35	0,018711
36	0,019849
37	0,021062
38	0,223510
39	0,023714
40	0,025153
273.16	1,00000
290	1,07218
300	1,11504
310	1,15785
320	1,20061

Vedlegg III

Formålinger av kobbertråden, utført ved 22,25 °C og R₀ vist i Tabell XX. MATLAB-script for å finne R₀ vist i Figur XX

Lengde [mm]	R _{22,25}	R ₀
3	228.2343	208.3622
3	237,2957	217,1034
4	455,2957	415,6537
7	16,71170	15,2566
12	44,55523	40,6759
29	80,17749	73,1965
50	129,8051	118,5031

Tabell XX:

```
%% Finne R0

Tm = 22.25+273.16
Rm = [228.2343 237.8091 455.2957 16.71170
44.55523 80.17749 129.8051];

x = [273.16 280 290 300 310 320];
y = [1.00000 1.02930 1.07218 1.11504
1.15785 1.20061];
x2 = 22.25+273.16;
y2spline = interp1(x,y,x2,'spline')

R0 = Rm/y2spline
```

MATLAB-script for å finne R₀

Vedlegg IV

Matlab script used to find the temperatures of the measurements in Appendix I. Information from Table II in Appendix II are used in this interpolation.

```

%% Interpolation
clear all; close all; clc;
x = [0.015757 0.01666 0.017648 0.018711 0.019849 0.021062 0.022351];
y = [32 33 34 35 36 37 38];
plot(x,y,'sk-')
hold on
x2 = [0.0212963 0.02063492 0.01984127 0.01924603 0.01832011 0.01785714
0.01699735]
y2spline = interp1(x,y,x2,'spline')
plot(x2,y2nearest,'b*')
plot(x2,y2linear,'go')
plot(x2,y2spline,'r^')
legend('Data','Spline')

```

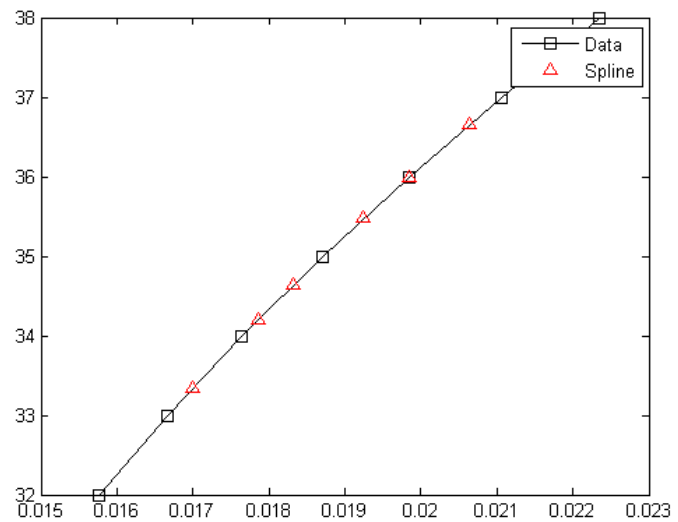


Figure I: The figure shows how the temperature at given R/R_0 . The x-axis shows the values of R/R_0 , and y-axis shows the temperature in K.