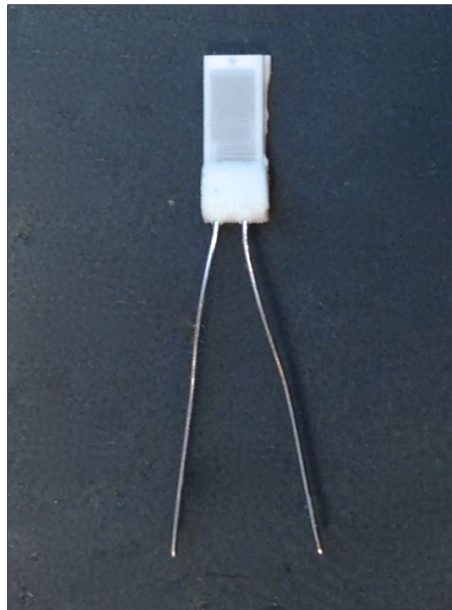


# CHALMERS



## Utveckling av mätsystem för termisk studie av transformator

*Examensarbete*

MARCUS JOHANSSON HJORT

ERIK ÖRNBERG

Institutionen för material- och tillverkningsteknik

Avdelning Elteknik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sweden 2013



# Utveckling av mätsystem för termisk studie av transformator

MARCUS JOHNSON HJORT  
ERIK ÖRNBERG

Institutionen för Energi- och miljöteknik  
Avdelning Elteknik  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sweden 2013

Utveckling av mätsystem för termisk studie av transformator  
MARCUS JOHANSSON HJORT  
ERIK ÖRNBERG

Institutionen för Energi- och miljöteknik  
Avdelning Elteknik  
Chalmers Tekniska Högskola  
SE-412 96 Göteborg  
Sweden  
Telefon +46 (0)31-772 1000

Framsida:  
Bild av motståndstermometer PT1000

Chalmers Bibliotek, Reproservice  
Göteborg, Sweden 2013

Utveckling av mätsystem för termisk studie av transformator

ERIK ÖRNBERG

MARCUS JOHNSON HJORT

Institutionen för Energi- & miljöteknik, Avd. Eltekink

Chalmers Tekniska Högskola

## Abstract

The main limiting factor with respect to continuous power handling in electrical machines and transformers is the temperature rise in the windings. Thermal models are therefore a valuable tool in the design process to be able to predict the operational temperature at certain operating points. To be able to construct such models, an accurate measurement system is needed to obtain the temperature in several positions over the test object.

This report describes the construction, calibration and evaluation of such a system. The system has eight channels where each channel is made up by of resistance thermometers, wheatstone bridges with amplification and separate data handling process. All testing are done on an ETD ferrite core with only one winding connected to a DC voltage supply. As a part of the objective of this report, the results from the measurements shall then be analysed to obtain thermal properties for the test object.

Regarding accuracy, the system performs well and the temperatures registered can be trusted. Due to very similar temperature levels in windings, they can be modelled as one part. The most important thermal resistance is between the surface of the object to the ambient air. A simple model is then constructed and tested.

**Index Terms:** Temperature Measurement, Thermal Modelling, Transformer



## Förord

Arbetet har utförts vid institutionen för Energi- och miljöteknik, avdelning elteknik vid Chalmers Tekniska Högskola. Den huvudsakliga delen av tiden som spenderats på detta arbete har haft praktisk karaktär. Vi vill även tacka Abraheem Malik för hans bidrag till arbetet.

Marcus Johnsson Hjort  
Erik Örnberg

Göteborg, Sverige, 2013



# Innehåll

<b>1</b>	<b>Introduktion</b>	<b>2</b>
1.1	Problembakgrund . . . . .	2
1.2	Syfte . . . . .	2
1.3	Avgränsningar . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Teori</b>	<b>3</b>
2.1	Förlusteffekt i ledare . . . . .	3
2.2	Ledningsresistans vid olika temperaturer . . . . .	3
2.3	Termisk teori . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Mätsystem</b>	<b>5</b>
3.1	Motståndstermometern Pt1000 . . . . .	5
3.2	Wheatstonebrygga . . . . .	6
3.3	Signalförstärkare . . . . .	6
3.4	Lågpas-filter . . . . .	6
3.5	Hela mätkretsen . . . . .	7
3.6	Databehandling . . . . .	8
3.6.1	LabView . . . . .	8
3.6.2	Matlab . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Metod</b>	<b>11</b>
4.1	Material . . . . .	11
4.2	PCB . . . . .	11
4.3	Inkoppling av motståndstermometrar . . . . .	12
4.4	Konstruktion av mätobjekt . . . . .	12
4.5	Övrig utrustning . . . . .	13
<b>5</b>	<b>Kalibrering</b>	<b>14</b>
5.1	Kalibreringsmetod 1 – Vatten i termos . . . . .	14
5.2	Kalibreringsmetod 2 – Halogenlampa . . . . .	14
5.3	Kurvanpassning av mätpunkter . . . . .	15
5.4	Kalibreringsmetod 3 – Oljebad . . . . .	16
5.5	Test av kalibrering . . . . .	17
<b>6</b>	<b>Mätningar</b>	<b>18</b>
6.1	Mätning 1 – Utan kärna . . . . .	18
6.2	Mätning 2 – Med kärna . . . . .	18
6.3	Mätning 3 – Utan kärna med isolerade sidor av bobin . . . . .	19
6.4	Mätning 4 – Med kärna och isolerad lindning . . . . .	20
<b>7</b>	<b>Analys</b>	<b>21</b>
7.1	Inledning . . . . .	21
7.2	Beräkning av $q$ . . . . .	21
7.3	Termisk modell av transformatorn . . . . .	22
7.4	Isolerad lindning . . . . .	23
7.5	Isolerade sidor av bobin utan kärna . . . . .	24
7.6	Förenkling . . . . .	25
7.6.1	Förenklad modell . . . . .	25
7.6.2	Beräkning av $R_{\theta LK}$ och $R_{\theta KA}$ . . . . .	25
7.6.3	Beräkning av $q_2$ och $R_{\theta LA}$ . . . . .	26
7.6.4	Verifikation av förenklad modell mot mätning 2 . . . . .	27
7.6.5	Termisk resistans per ytenhet . . . . .	28
<b>8</b>	<b>Resultat</b>	<b>29</b>
8.1	Framtida arbete . . . . .	29

# 1 Introduktion

## 1.1 Problembakgrund

Hur mycket effekt som en transformator klarar av att hantera kontinuerligt, bestäms till stor del av värmeutvecklingen på grund av förlusteffekter. När transformatorn belastas hårt ger detta upphov till stora strömmar i lindningarna. Detta innebär att temperaturen stiger vilket kan skada isoleringen hos ledarna, vilket leder till kortslutning och haveri.

Det vore fördelaktigt att ha enklare termiska modeller för att i ett tidigt designstadium kunna approximera den temperaturnivå som transformatorn uppnår vid drift. Därför är det av stort intresse att tillhandahålla sådana modeller.

## 1.2 Syfte

Syftet med denna rapport är att beskriva utvecklingen av ett mätsystem för de temperaturer som uppstår i en transformatorlindning vid olika belastning. Sedan skall detta system utvärderas. Utifrån mätresultat från utvecklat system skall sedan transformatorn modelleras termiskt för att erhålla den termiska resistansen mellan transformatorns olika delar och skikt.

## 1.3 Avgränsningar

Mätsystemet kommer att fokusera på värmeutvecklingen i en lindning runt en ETD-ferritkärna vid olika belastning. Värt att poängtera är att kärnan lindas enbart med just en lindning. Lindningen kommer anslutas till likspänning vilket innebär att inga förluster kommer att uppstå i kärnan till skillnad från växelspanning då kärnförluster också måste beaktas. Endast termisk ledning kommer att studeras, alltså inte fenomenen termisk strålning eller termisk konvektion.

## 2 Teori

### 2.1 Förlusteffekt i ledare

När en ström flyter genom en icke förlustfri ledare ger detta upphov till en förlusteffekt i form av värmeutveckling. Denna förlusteffekt är lika med spänningsfallet över ledaren multiplicerat med strömstyrkan i ledaren enligt

$$P = UI \quad (2.1)$$

Spänningsfallet kan uttryckas enligt

$$U = RI \quad (2.2)$$

Vid kombination av (2.1) och (2.2) erhålls

$$P = RI^2 \quad (2.3)$$

### 2.2 Ledningsresistans vid olika temperaturer

Resistansen hos en kopparledning ökar med temperaturen[2] enligt

$$R_T = R_0(1 + \alpha(T - T_0)) \quad (2.4)$$

där:  $R_T$  är resistansen vid temperaturen  $T$

$R_0$  är resistansen vid rumstemperatur

$T$  är ledarens temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_0$  är rumstemperaturen

$\alpha = 0.00393$ , temperaturkoefficient för koppar

### 2.3 Termisk teori

Här presenteras grundläggande termiska samband. Alla samband och lagar som presenteras gäller för jämviktstillstånd (steady-state). För att skapa bättre förståelse för hur värmen fortplantas kan sambanden illustreras i elektriska termer enligt Tabell 2.1. På så vis kan man skapa termiska "kretsar" där elektrisk kretsteori kan tillämpas[4].

Tabell 2.1: *Analogi mellan termiska och elektriska storheter.*

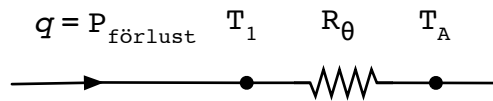
Termisk storhet	Elektrisk storhet
Termisk överföringsgrad $q$ (eller $P_{förlust}$ ), [W]	Strömstyrka, $I$ [A]
Temperaturskillnad $\Delta T$ , [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Potentialskillnad, Spänning, $U$ [V]
Termisk resistans $R_{\theta}$ , [ $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ]	Resistans, $R$ [ $\Omega$ ]
$q = \Delta T/R_{\theta}$ , [W]	$I = U/R$ [A]

Den termiska överföringsgraden  $q$  är lika med effektförlusten  $P_{förlust}$  ur (2.3) vilket ger

$$q = P_{förlust} = RI^2 \quad (2.5)$$

Då förlusteffekten, den termiska resistansen samt omgivningstemperaturen är känd, kan temperaturen i komponenten beräknas med hjälp av sambandet

$$q = P_{förlust} = \frac{\Delta T}{R_{\theta}} = \frac{(T_1 - T_A)}{R_{\theta}} \quad (2.6)$$

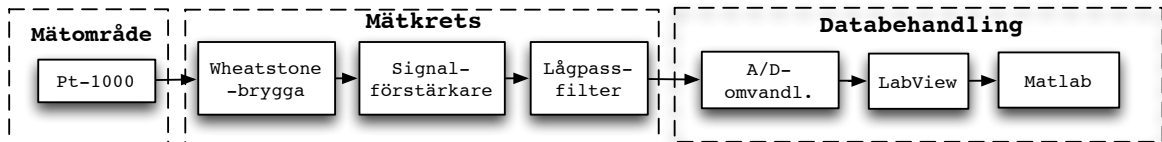


Figur 2.1: *Elektrisk analogi av värmeöverföring.*

där:  $\Delta T$  är temperaturskillnaden  
 $R_\theta$  är den termiska resistansen  
 $T_A$  är omgivningstemperaturen  
 $T_1$  är mättemperaturen  
 $P_{förlust}$  är förlusteffekten

### 3 Mätssystem

För att kunna mäta temperaturen i utvalda punkter på transformatorn har ett mätsystem utvecklats. Figur 3.1 visar en översiktsbild av systemet. Systemet är uppbyggt av tre olika huvudfunktioner; mätområdet, mätkretsen och databehandlingen. I mätområdet påverkas resistansen hos motståndstermometrar av temperaturen. Denna skillnad ger upphov till en spänningsförändring i mätkretsen. Spänningssignalen skickas från mätkretsen till databehandlingen som har till uppgift att registrera och omvandla spänningen till en temperatur. En detaljerad förklaring av de olika delfunktionerna ges i avsnitt 3.1 till 3.6.



Figur 3.1: Blockschemata för mätmetod

#### 3.1 Motståndstermometern Pt1000

För att mäta temperatur med så kallade motståndstermometrar utnyttjas det faktum att resistansen hos metaller är temperaturberoende. Resistansen hos metaller är positivt temperaturberoende, vilket betyder att när temperaturen ökar så ökar även resistansen.

Den typ som använts är en motståndstermometer av typen Pt1000[1]. Detta motstånd är tillverkat av platina, vilket har ett nästintill linjärt samband mellan resistans och temperatur. Vidare har platina hög smältpunkt vilket ger ett stort arbetsområde. Motståndets resistans ges av

$$R_T = R_0(1 + AT + BT^2 + C(T - 100)T^3) \tag{3.1}$$

där:  $T$  är temperaturen

$R_0 = 1000 \Omega$  är resistansen vid  $T = 0^\circ\text{C}$

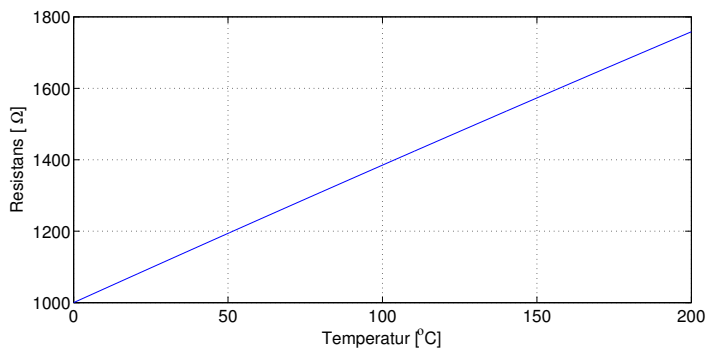
$A = 3.908 \times 10^{-3}$

$B = -5.8019 \times 10^{-7}$

$C = 0$  för  $T > 0$

Nedan, i Figur 3.2 visualiseras 3.1. Namnet PT1000 syftar på att resistansen är  $1000 \Omega$  vid  $0^\circ\text{C}$ .

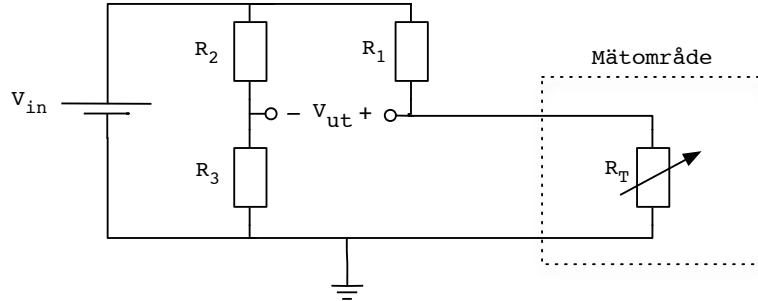
Vid  $T = 0^\circ\text{C}$  blir således  $R_T = R_0 = 1000 \Omega$ .



Figur 3.2: Resistans-/temperaturkaraktäristik för ett Pt1000-element enligt (3.1).

### 3.2 Wheatstonebrygga

För att utnyttja en motståndstermometers temperatur-/resistansförhållande placeras den i en så kallad *Wheatstonebrygga* som kan studeras i Figur 3.3.



Figur 3.3: *Wheatstonebrygga*

Resistanserna  $R_1, R_2$  och  $R_3$  har alla samma resistans av  $1000 \Omega$ . Resistansen för motståndstermometern Pt-1000 representeras av resistansen  $R_T$ . När temperaturen i mätområdet förändras ger detta upphov till att  $R_T$  förändras, enligt (3.1). Mätsignalen ut från systemet blir då spänningen  $V_{ut}$  som kan härledas fram genom spänningsdelning enligt

$$V_{ut} = V_{in} \left( \frac{R_T}{R_T + R_1} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) \quad (3.2)$$

Vid  $T = 0^\circ\text{C}$  är  $R_T = R_0 = R_1 = R_2 = R_3$  vilket medför att  $V_{ut} = 0$ .

### 3.3 Signalförstärkare

Mätspänningen  $V_{ut}$  från wheatstonebryggan kopplas vidare till en instrumentförstärkare[5] som har till uppgift att förstärka signalen. Detta görs för att anpassa mätsignalen till A/D-omvandlarens arbetsområde och därmed erhålla en högre upplösning för mätsignalen då den registreras i datorn. Den A/D-omvandlare som använts har i detta fall haft ett arbetsområde på  $\pm 5 \text{ V}$ . Förstärkningen hos instrumentförstärkaren beskrivs enligt

$$G = 5 + \frac{200k}{R_G} \quad (3.3)$$

I detta fall lämnas  $R_G$ :s plats tom vilket ger  $R_G = \infty \Omega$ , vilket medför 5 gångers förstärkning. Den förstärkta utspänningen  $V_{mät}$  blir då enligt

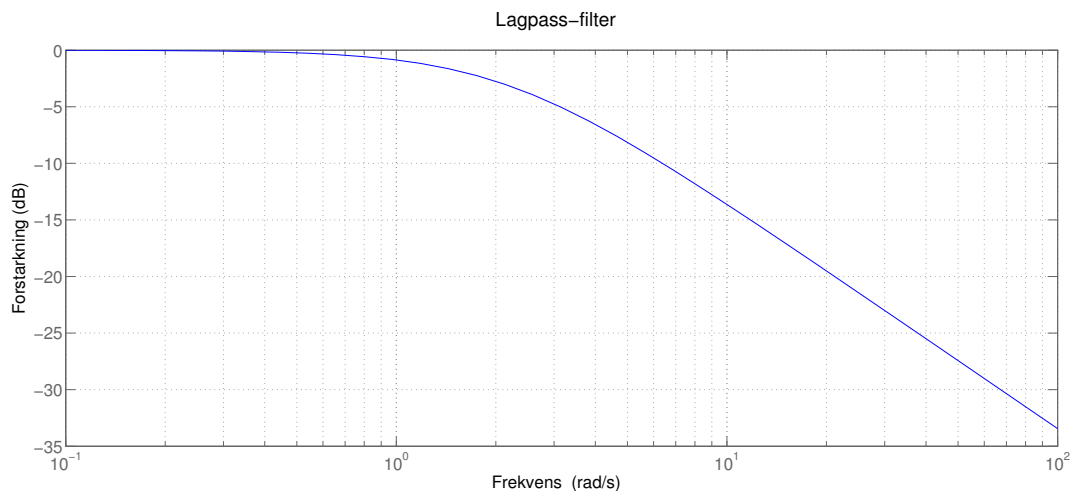
$$V_{mät} = 5 \times V_{ut} \quad (3.4)$$

### 3.4 Lågpass-filter

För att eliminera eventuella störningar från omgivningen appliceras ett lågpassfilter på förstärkarens utsignal ( $R_{RC}$  &  $C_{RC}$  i Figur 3.5).  $R_{RC}$  väljs till  $1000 \Omega$  och  $C_{RC}$  väljs till  $470 \mu\text{F}$  och därmed erhålls en brytfrekvens  $f_c = 0,34\text{Hz}$  enligt

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_{RC} C_{RC}} \quad (3.5)$$

Detta innebär att för alla störningar med en frekvens över  $0,34 \text{ Hz}$  kommer amplituden att dämpas enligt förstärkning/frekvenskurvan enligt Figur 3.4.



Figur 3.4: Bodediagram för Lågpass-filter

### 3.5 Hela mätkretsen

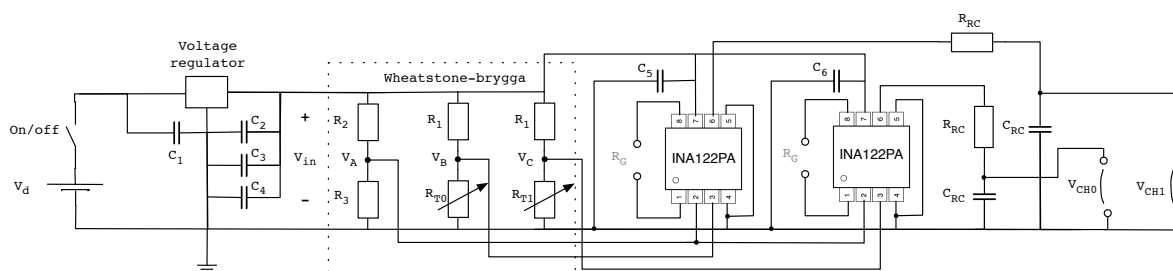
I Figur 3.5 visas kretsutbyggnaden för temperaturmätning av två separata mätpunkter. Mätkretsen är konstruerad för att förses med spänning från ett 9V-batteri ( $V_d$ ). För att säkerställa att spänningen över wheatstone-bryggorna ( $V_{in}$ ) är konstant, även om batterispänningen skulle minska, har en spänningsregulator lagts till. Regulatorn sänker spänningen till  $\approx 4,94V$ . Utöver regulatorn ansluts även fyra kondensatorer med olika kapacitans, detta för att filtrera bort eventuella transienta spänningstoppar hos ingångsspänningen. Även matningsspänningen till instrumentförstärkarna är försedd med en kondensator för att ytterligare stabilisera spänningen.

Då mätningar kommer att utföras i upp till 8 mätpunkter byggs kretsen ut med ytterligare 6 steg. För varje ytterligare kanal som adderas till kretsen, ansluts ytterligare ett "ben" till i wheatstonebryggan, en instrumentförstärkare och ett lågpasfilter.

Den mätspänning som datorn kommer att registrera från de två kanalerna i figuren nedan blir

$$V_{CH0} = G(V_B - V_A) \quad (3.6)$$

$$V_{CH1} = G(V_C - V_A) \quad (3.7)$$



Figur 3.5: Mätkrets för två kanaler

## 3.6 Databehandling

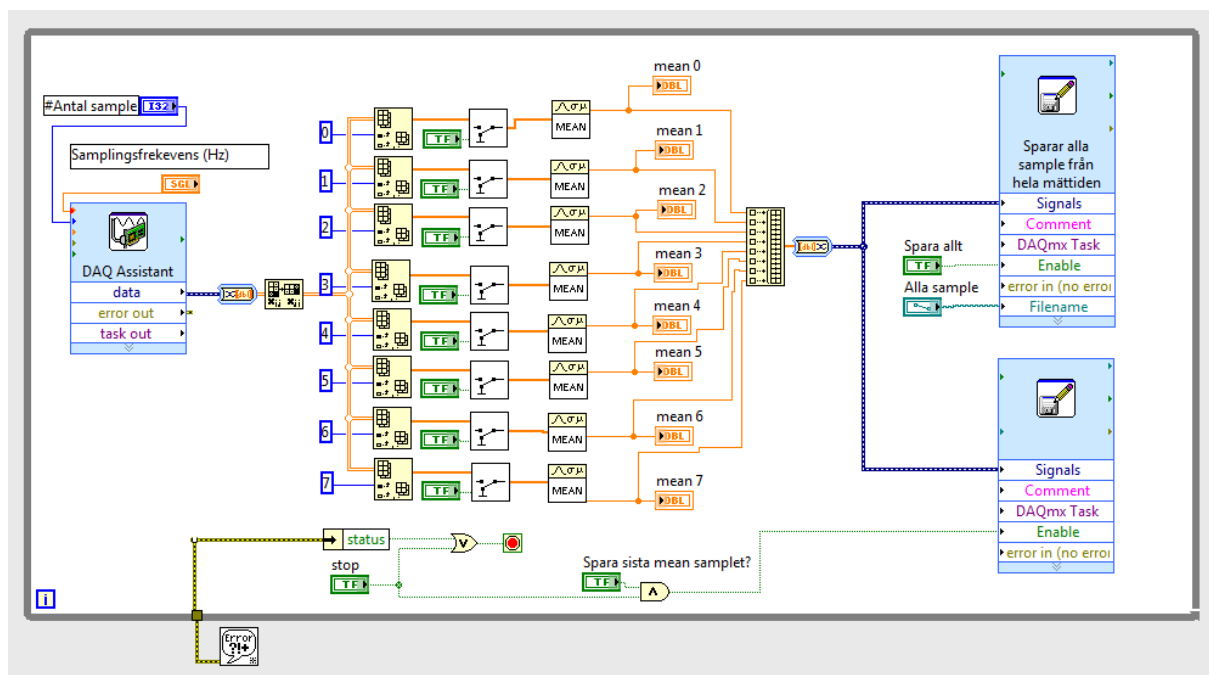
De analoga spänningssignalerna från respektive kanal i mätkretsen kopplas via koaxialkabel till en kopplingspanel som i sin tur är ansluten till en A/D-omvandlare som är monterad i en PC.

### 3.6.1 LabView

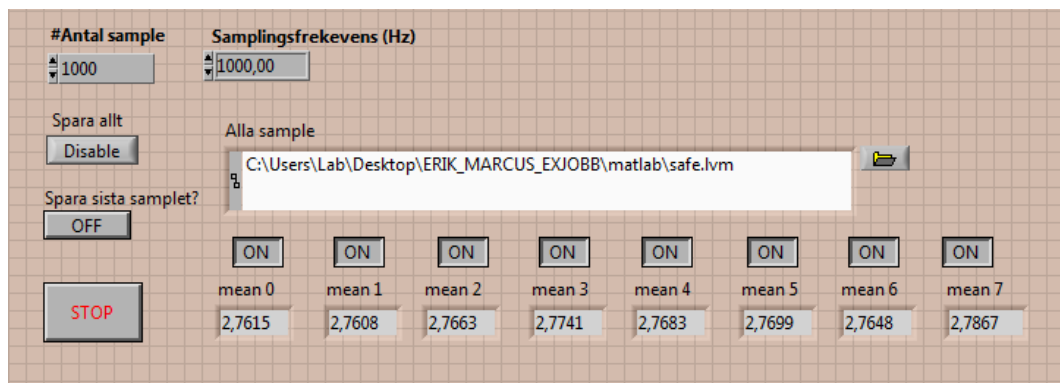
För att kontinuerligt inhämta mätdata över längre tid, skapas ett program i mjukvaran LabView. Programmets blockdiagram visas i Figur 3.6. Strukturen bygger på en while-loop som vid varje iteration inhämtar ett förbestämt antal mätvärden från de 8 olika kanalerna. Längst till vänster i figuren finns ett block som motsvarar A/D-omvandlaren (DAQ). Operatören kan mata in önskad samplingsfrekvens och antal sampel via kontrollfönstret(Figur 3.7).

Under varje iteration insamlar DAQ:en de förbestämda antal sampel från varje kanal och skickar vidare värdena som en tvådimensionell vektor. Vektorn delas sedan upp till 8 st endimensionellas vektorer för att sedan medelvärdesbilda samtliga mätvärden. Detta medelvärde presenteras kontinuerligt i kontrollfönstret för varje kanal. Alla medelvärden förs sedan samman igen till en tvådimensionell vektor som sedan skrivs till en förbestämmd text-fil med 8 kolumner, en för varje kanal (se exempel i Tabell 3.1).

Vid utförda mätningar är samplingsfrekvensen 1000 Hz över 1000 sampel vilket medför att varje iteration uppgår till en sekund. Medelvärdena för varje iteration presenteras kontinuerligt i kontrollfönstret. Loopen fortsätter tills dess att operatören avbryter programmet genom att trycka på ”STOP”.



Figur 3.6: Blockdiagram för mätprogram i LabView



Figur 3.7: Kontrollfönster för mätprogram i LabView

### 3.6.2 Matlab

Alla inhämtade data från LabView måste behandlas matematiskt för att kunna härledas till en temperatur. I ideal-fallet hade temperaturen bestämts genom att först dividera bort förstärkningen, för att sedan beräkna resistansen  $R_T$  med hjälp av (3.2). När sedan resistansen för motståndstermometern är känd kan temperaturen beräknas ur (3.1). Alla ovannämnda steg hade enkelt utförts i Matlab och temperaturen över hela mättiden hade erhållits korrekt.

För att hela denna kedja skall återge en korrekt temperatur måste hela mätkretsen vara ideal. Detta innebär till exempel att alla ledare är resistanslösa, alla motstånd är av exakt angivna värden och att motståndstermometern följer resistans/temperaturkurvan precist. Så är emellertid inte fallet, utan det visar sig efter tester att systemet är långt ifrån linjärt med icke försumbara skillnader mellan kanalerna. För att få pålitliga mätresultat måste därför hela systemet kalibreras mot en extern temperaturreferens. Denna process beskrivs i avsnitt 5. Resultatet av kalibreringen blir att varje kanal tilldelas en egen matematisk temperaturfunktion som beror av mätspänningen för samma kanal.

Tabell 3.1: Exempel på 8 sampel för samtliga 8 kanaler.

Sample	CH0[V]	CH1[V]	CH2[V]	CH3[V]	CH4[V]	CH5[V]	CH6[V]	CH7[V]
1	0.578879	0.580703	0.580706	0.579910	0.585322	0.575439	0.588525	0.642227
2	0.580720	0.582388	0.582573	0.581760	0.587224	0.575522	0.589524	0.642173
3	0.581587	0.584878	0.585286	0.584221	0.589197	0.575398	0.590483	0.642192
4	0.583716	0.586487	0.586929	0.586345	0.591362	0.575540	0.591021	0.642295
5	0.585671	0.588423	0.588962	0.588394	0.593569	0.575540	0.592571	0.642065
6	0.586638	0.590356	0.591013	0.590527	0.595591	0.575566	0.593430	0.642107
7	0.588359	0.592251	0.593230	0.592620	0.597798	0.575610	0.595076	0.642046
8	0.590056	0.594175	0.595325	0.594905	0.600024	0.575754	0.595762	0.642070

För att avläsa dessa spänningsvärden skapas ett Matlabprogram som separerar kanalerna för att sedan räkna om till temperatur med hjälp av varje kanals egna temperaturfunktion. Hur denna temperaturfunktion tas fram kan studeras i avsnitt 5.3. Temperaturvärdena placeras av programmet i varsin vektor för att sedan presenteras grafiskt över tid. Eftersom ett sampel motsvarar en sekund skapas en vektor med värden från 0 till ("antal sampel"-1) för att användas som tidsvektor.

Urdrag ut matlabprogrammet:

```
load('filnamn.lvm')           Läser in fil med mätdata

kanal0=filnamn(:,1);         Placerar första kolumnen spänningsvärden i en vektor
kanal1=filnamn(:,2);
kanal2=filnamn(:,3);
⋮
x=0:length(kanal0)-1;       Skapar en tidsvektor från antal sampel

y0=FitCH0(kanal0);          Skapar en temperaturvektor efter temperaturfunktion
y1=FitCH1(kanal1);
y2=FitCH2(kanal2);
⋮
plot(x,y0,x,y1,x,y2,x,y3,x,y4,x,y5,x,y6,x,y7,); Graf över temperaturförändringen
```

## 4 Metod

I detta avsnitt beskrivs ingående hur mätkretsen och mätobjektet konstruerats. Material och utrustning som använts vid mätningarna beskrivs även här.

### 4.1 Material

Alla de komponenter och material som har använts under utvecklingen av mätsystemet presenteras i Tabell 4.1.

Tabell 4.1: *Materialista*

Mätobjekt-material	Kvantitet	Datablad
ETD kärnhälvor	2 st	[6]
Bobin	1 st	[6]
Värmeledande pasta	100 g	[7]
Krympslang 1.2 mm	3 m	[8]
Krympslang 2.4 mm	3 m	[8]
Isolerande tejp 12 mm	1 rulle	[9]
Motståndstermometer Pt-1000	8 st	[1]
Lindningsledare $d = 0.85$ mm	25 m	-
Enkelledare (flertrådig)	10 m	-

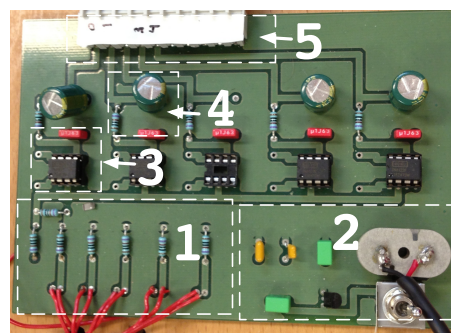
PCB-material	Kvantitet	Datablad
Högprecisionsmotstånd 1 k $\Omega$	20 st	
Kondensator 470 $\mu$ F	8 st	
Kondensator 0.33 nF	2 st	
Kondensator 10 nF	1 st	
Kondensator 100 nF	9 st	
Instrumentförstärkare	8 st	
Strömställare	1 st	
Kontaktplatta för 9V-batteri	1 st	
Kopplingsplint utgående	2 st	
Spänningsregulator	1 st	
Koaxialkabel	5 st	

### 4.2 PCB

I Figur 3.5 kunde mätkretsen för två kanaler studeras. För att fysiskt konstruera motsvarande krets för åtta kanaler beställs två PCB - Printable Circuit Board, för hålmontering av de elektroniska komponenter som utgör kretsen. Varje kort har plats för fem kanaler. Utvalda komponenter beställs separat och löds fast på avsedda platser. I avsnitt 4.1, Tabell 4.1 hittas PCBn's samtliga komponenter och deras specifikationer.

I Figur 4.1 visas ett av korten där:

- 1 är wheatstonebryggan med 5 ben med utgångar för givare
- 2 är strömförsörjning med spänningsregulator samt kondensatorer
- 3 är instrumentförstärkare med tillhörande kondensator för matningsspänningen
- 4 är lågpass-filter
- 5 är kopplingsplint för utgående mätspänningar

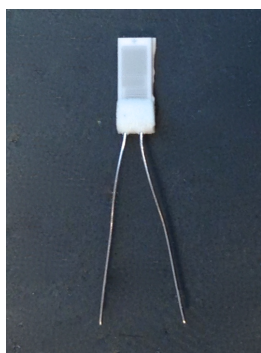


Figur 4.1: "Printable Circuit Board" innehållande 5 mätkanaler, varav 4 aktiva.

### 4.3 Inkoppling av motståndstermometrar

Figur 4.2 visar ett Pt1000-element. Till benen löds varsin ledare fast. Lödpunkterna kläds in med krympslang för att isoleras ifrån varandra. Ytterligare en krympslang placeras över både elementet samt lödpunkterna för att skapa en mekanisk stabilitet enligt Figur 4.3.

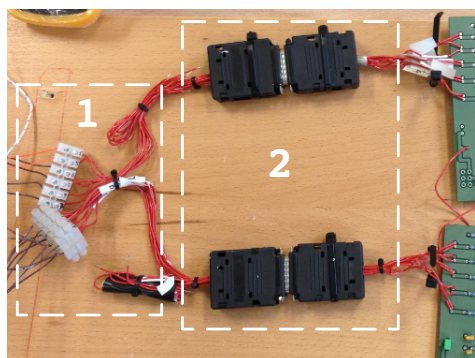
För att underlätta hanteringen av mätkrets och mätobjekt konstrueras en snabbkoppling mellan PCB:t och motståndstermometrarna. På detta sätt möjliggörs enkel frånkoppling mellan mätobjekt och mätkrets. Denna koppling skapar även möjlighet att mäta resistansen av en specifik motståndstermometer då denna inte längre har kontakt med mätkretsen utan att behöva koppla ut ledarna från kopplingsplinten. Ur datainsamlingssynpunkt har snabbkopplingen ingen funktion och är därför inte preciserad i Figur 3.3. Vid motståndstermometrarnas avsedda plats på kretskorten, löds ledare från ena sidan av snabbkopplingen fast. Motståndstermometrarna ansluts via tunna enledarkablar via en kopplingsplint till andra halvan av snabbkopplingen. Kopplingsplinten kan ses som överflödigt men fyller, likt snabbkopplingen, en praktisk funktion genom att möjliggöra enkelt utbyte av en eventuellt defekt motståndstermometer. Placeringen av motståndstermometrarna i mätobjektet beskrivs i avsnitt 4.4.



Figur 4.2: PT1000-element



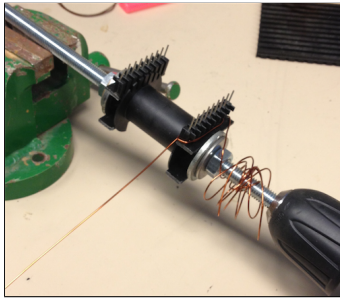
Figur 4.3: PT1000 ansluten till ledare samt krympslang



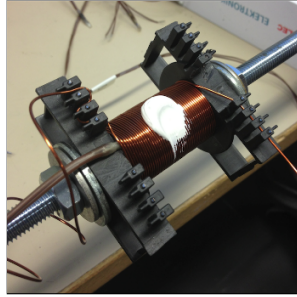
Figur 4.4: Kopplingar mellan givare och PCB. 1. Kopplingsplint 2. Snabbkoppling

### 4.4 Konstruktion av mätobjekt

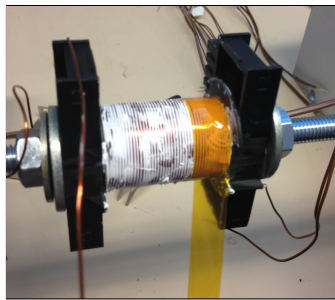
Mätobjektet består av en bobin av plast där transformator kärnan kan placeras inuti (figur 4.5). Bobinen placeras över en gängad stav som roteras med hjälp av en skruvdragare vid lindningsprocessen. Varven lindas runt bobinen där 43 varv/skikt är möjligt med vald tvärsnittsarea hos lindningsledaren. När ett skikt är lindat appliceras den termiskt konduktiva pastan (figur 4.6). Pastan fördelas ut jämnt över lindningen för att skapa en så homogen temperatur i varje lindningsskikt som möjligt. Över pastan sätts en elektriskt isolerande tejp för att återskapa en verklig transformators material (figur 4.7). När ett skikt är färdigt påbörjas nästa med att ett Pt1000-element placeras ovanpå tidigare skikt för att sedan fixeras av nästa lindningsskikt (figur 4.8). Valda mätpunkter är under varje lindningsskikt, ut-



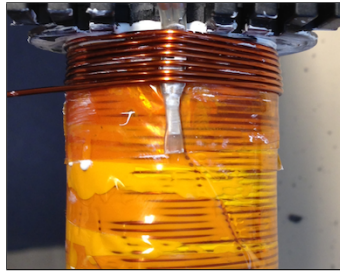
Figur 4.5: Tom bobin innan lindning är påbörjad



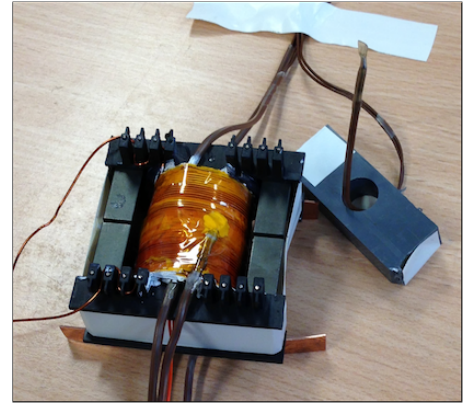
Figur 4.6: Applicering av termiskt konduktiv pasta på lindningen



Figur 4.7: Montering av tejp



Figur 4.8: Montering av Pt1000-element



Figur 4.9: Hela mätobjektet med givare för omgivningstemperatur

anpå kärnan, utanpå det yttersta lindningsskiktet och omgivningstemperatur (figur 4.9). Då maximalt åtta mätpunkter är möjligt, lindas totalt fem skikt runt bobinen.

#### 4.5 Övrig utrustning

För att skapa en homogen omgivningstemperatur runt mätobjektet täcks det med en enkel plastlåda. Spänningskällan som används är strömstuv vilket medför att spänningen successivt ökar när lindningens resistans ökar med temperaturen, medan strömmen är hålls på en stabil nivå.

## 5 Kalibrering

Även då samtliga systemets motståndstermometerar placeras i en homogen känd temperatur, registreras olika spänningsnivåer för de olika kanalerna och alltså i förlängningen även olika temperaturer. Detta talar för att kretsen har egenskaper som är långt ifrån det ideala fall om beskrivs i avsnitt 3. Därför kan inte denna teori användas då en mätspänning skall räknas om till temperatur. A/D-omvandlaren är också en eventuell felkälla och måste kalibreras för att återge korrekt spänningsnivå till mjukvaran.

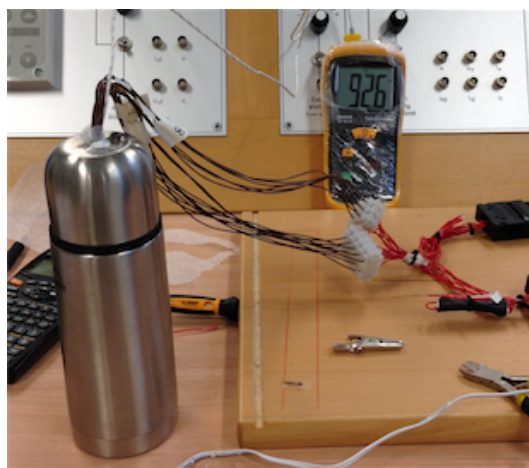
För att erhålla så exakta mätresultat som möjligt kalibreras systemet istället i sin helhet. Genom att registrera spänningsvärden från varje kanal vid ett antal olika temperaturer, kan sedan en kurva anpassas matematiskt till dessa punkter. Således erhålls en för varje kanal unik temperaturfunktion som beror av den faktiska mätspänningen vid kända temperaturer. Referenstemperaturen mäts med en extern termometer med en mätosäkerhet på  $\pm 0,5\%$ .

Då samtliga givare och referenstermometern måste finnas i exakt samma temperatur vid kalibreringen, är det av yttersta vikt att en helt homogen temperatur skapas. På så sätt kan spänningsnivåerna knytas samman till just den temperaturen.

### 5.1 Kalibreringsmetod 1 – Vatten i termos

Samtliga Pt1000-givare placeras tillsammans med den externa temperaturmätaren i en termos fylld med hett vatten. Efter 5 minuter när temperaturen har stabiliserats, noteras spänningsnivåerna från samtliga kanaler samt rådande temperatur som avläses från den externa termometern. Genom att hålla i en mindre mängd kallvatten under omrörning i termos, erhålls en lägre temperatur. Då temperaturen återigen stabiliserats registreras spänningen och temperaturen. Processen upprepas för åtta temperaturer utspridda över intervallet 15-95°C. Temperaturreferenserna väljs godtyckligt över mätintervallet. Således finns då spänningsvärden för varje Pt1000-givare vid ett antal temperaturer under 100°C.

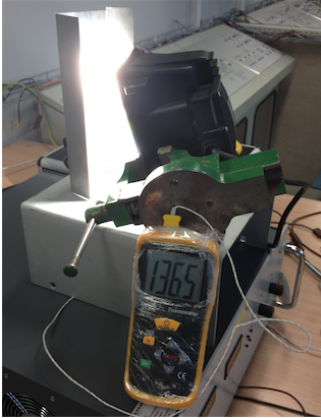
Denna teknik har nackdelen att vatten kan tränga in och kortsluta motståndstermometrarna. Detta skedde flera gånger under försöken. För att komma i ordning med problematiken kapslades givarna in ytterligare. En närmare beskrivning av hur givarna konstrueras kan läsas i avsnitt 4.3. Efter flera kalibreringsförsök erhöles en komplett kalibrering. Tekniken har den uppenbara bristen att den bara ger kalibreringspunkter för under 100°C.



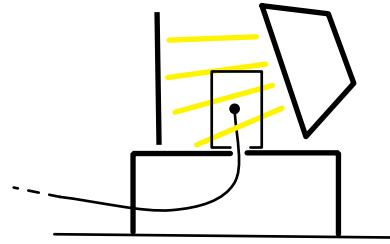
Figur 5.1: Kalibrering för mätområde 0-100°C

### 5.2 Kalibreringsmetod 2 – Halogenlampa

För temperaturer över 100°C måste en annan metod än *metod 1* användas för att skapa en homogen temperatur. En tunn aluminiumcylinder, som är försluten i toppen och med en liten öppning i botten, placeras stående på en plåt med motsvarande öppning. Genom öppningarna förs knippet med sensorerna samt referenstermometern in. Behållaren belyses sedan på nära håll med en kraftig halogenlampa för att värma upp luften inuti cylindern. Med hjälp av en lös aluminiumplåt, som placeras på olika avstånd stående på andra sidan cylindern från lampan, kan temperaturen i cylindern justeras för att även här få flera mätpunkter. Figur 5.2 visar metoden och Figur 5.3 visar en principskiss.



Figur 5.2: Kalibrering för mätområde  $>100^{\circ}\text{C}$



Figur 5.3: Principskiss över kalibreringsmiljö  $>100^{\circ}\text{C}$ .

### 5.3 Kurvanpassning av mätpunkter

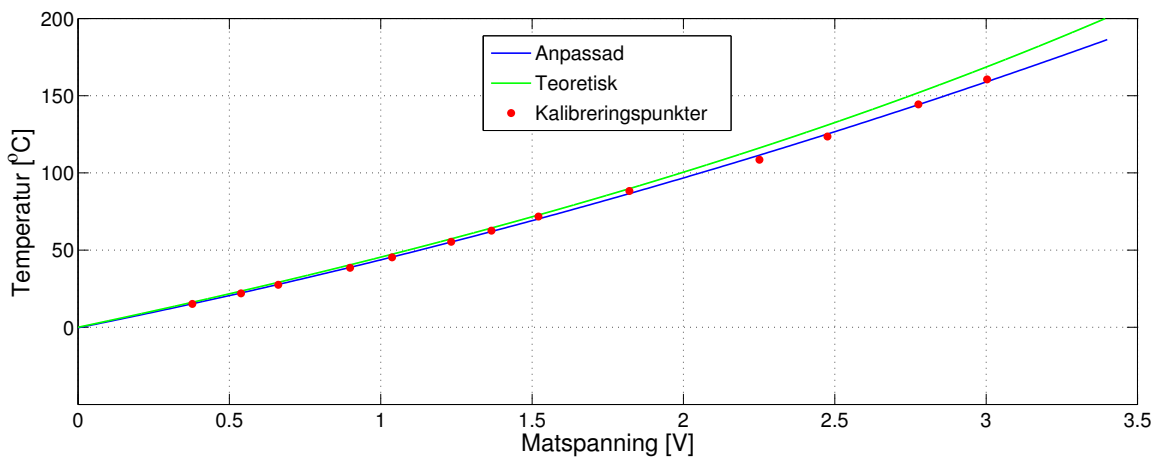
Genom att bilda två vektorer av kalibreringstemperaturerna respektive spänningsvärdena, skapas med hjälp av matlab en andragsradsfunktion som bäst överensstämmer med kalibreringspunkterna. Koden nedan är ett exempel på kurvanpassning för en mätkanal(CH0). Matlab-kod för samtliga åtta kanaler kan studeras i Appendix under Bilaga 1

```
T=[160.6; 144.4; 123.6; 108.5; 88.3; 71.7; 62.6; 55.4; 45.3; 38.5; 27.5; 22; 15.1];
CH0=[3.003000; 2.776035; 2.475562; 2.250981; 1.821460; 1.521045; 1.365869; 1.232666;
1.037549; 0.898682; 0.661646; 0.538379; 0.377759];
FitCH0=fit(CH0,T,'poly2');
x=0:0.01:4;
y=FitCH0(x);
:
plot(x,y,CH0,T,'.r') % plot figur 5.4
```

För denna kanal blir temperaturfunktionen enligt

$$T(V) = 4.545V^2 + 39.44V - 0.3249 \quad (5.1)$$

I Figur 5.4 visualiseras den anpassade kurvan och de kalibreringspunkter som erhållits under kalibreringsmetod 1 och 2 tillsammans med motsvande teoretiska kurva som fås då (3.1),(3.2) och (3.4) kombineras.

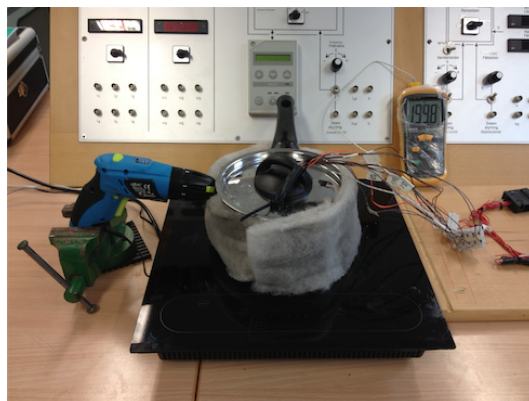


Figur 5.4: Kalibreringspunkter från metod 1 och 2 med tillhörande kurvanpassning samt teoretisk kurva

Ur Figur 5.4 kan noteras att den anpassade kurvan stämmer mycket väl med kalibreringspunkterna vid den undre halvan av temperaturskalan. Tyvärr är fallet ett annat för de högre temperaturerna. Ett skäl till detta kan vara att försöken att skapa en homogen temperatur vid kalibreringsmetod 2 har misslyckats. Vid spänning 2.250981 V skall temperaturen enligt kalibreringen vara 108.5°C. Samma spänningsvärde i (5.1) ger 111.48°C. Denna avvikelse är inte acceptabel, varpå en annan och mer tillförlitlig kalibreringsmetod måste tas fram.

## 5.4 Kalibreringsmetod 3 – Oljebad

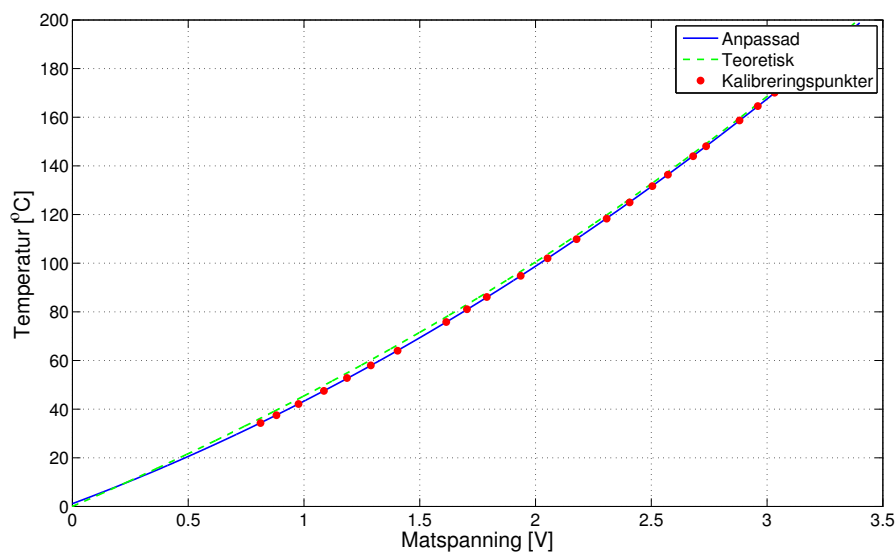
Denna kalibreringsmetod har egenskapen att den ger kalibreringspunkter över hela temperaturskalan som mätningarna kommer att utföras på i ett senare skede. En kastrull i rostfritt stål fylls med rapsolja som värms upp på en induktionsplatta. När önskad högsta temperatur har uppnåtts, stängs plattan av för att sedan få svalna av långsamt. Kastrullen kläds med ett isolerande material till en början för att minska avsvallingstakten vid höga temperaturer. Eftersom avsvalingen är störst mot kastrullens kant måste omrörning ske när kalibreringspunkter erhålls för att säkerställa att alla givarna utsätts för samma temperatur. Genom ett hål i kastrullens sida förs ett centrumborr genom som roteras med hjälp av en skruvdragare. På så sätt kan oljan cirkulera för att skapa en homogen temperatur i kastrullen. På samma sätt som beskrivs i avsnitt 5.3 skapas en temperaturkurva efter punkterna enligt



Figur 5.5: Kalibrering med oljebad

$$T(V) = 6.661V^2 + 35.48V + 1.139 \quad (5.2)$$

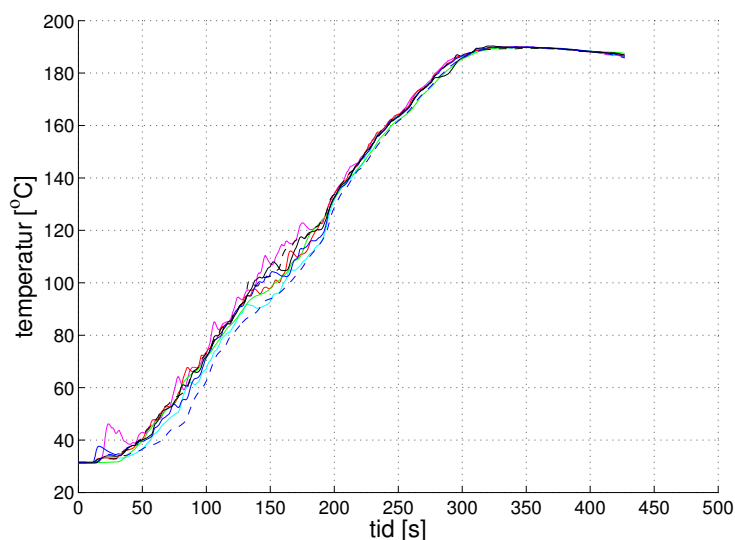
Denna gång har ett större antal punkter skapats för att få en mer exakt anpassning. I Figur 5.6 kan kalibreringspunkterna från oljebadet studeras tillsammans med den anpassade kurvan. Denna metod ger en temperatur som avviker mycket lite från kalibreringen. Även avvikelsen från teorin är avsevärt mycket mindre. Den största avvikelse mellan kalibreringspunkt och anpassad kurva sker vid 52.8°C. Den anpassade kurvan ger här 52.59°C.



Figur 5.6: Kalibreringspunkter från metod 3 med tillhörande kurvanpassning

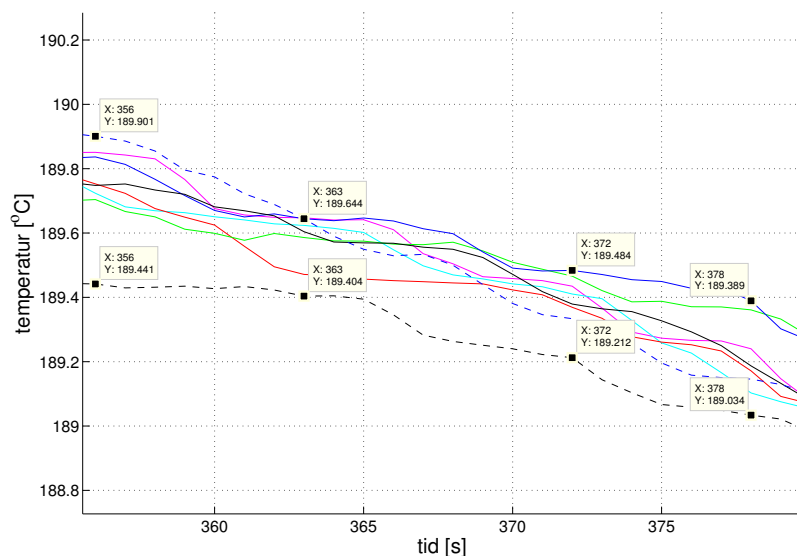
## 5.5 Test av kalibrering

För att testa kalibreringsmetod 3 utsätts givarna för samma miljö som under insamlingen av kalibreringspunkter. Syftet är att kontrollera om samtliga kanaler nu uppvisar samma temperatur. I Figur 5.7 ses hela det transienta förloppet av temperaturen för samtliga givare när de är placerade i samma oljebad under uppvärmning och efter att värmeförseln upphör vid ca 310 s. Först efter ca 200 s startas omrörningen vilket gör att temperaturen som givarna registrerar blir mycket mer homogen. Detta poängterar vikten av omrörning under insamlingen av kalibreringspunkterna.



Figur 5.7: Test av kanaler efter kalibrering

Tiden efter att värmeförseln har slagits av, är givarnas temperaturdifferens absolut minst. Detta förklaras av att värmeplattan nu inte "stör" omröringens uppgift att skapa en homogen temperatur. Denna period studeras i Figur 5.8. Dessa avvikelser betraktas som såpass små att mätningar med denna kalibrering blir tillräckligt tillförlitliga.



Figur 5.8: Test av kanaler efter kalibrering med fokus på den mest homogena perioden

## 6 Mätningar

För att kunna fastställa mätobjektets termiska resistanser utförs en serie tester av olika karaktär och med olika strömstyrka. För samtliga mätningar placeras Pt1000-elementen enligt Tabell 6.1.

Tabell 6.1: *Placering av PT1000-element i mätobjekt*

Mätkanal	Placering
0	Under lindingsskikt 1
1	Under lindingsskikt 2
2	Under lindingsskikt 3
3	Under lindingsskikt 4
4	Under lindingsskikt 5
5	Utanpå kärnan*
6	Utanpå lindningen
7	Omgivning

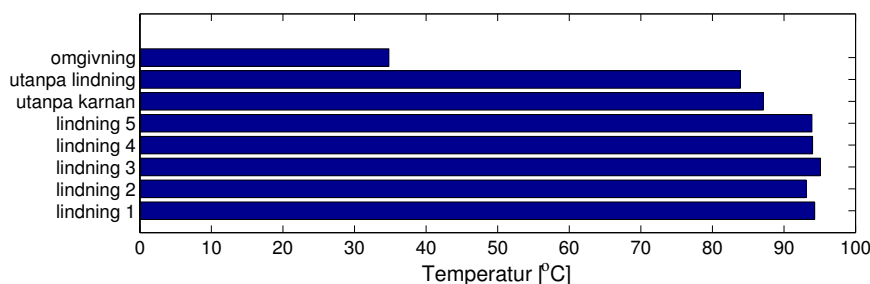
\* För mätningar utan kärna placeras elementet i tomrummet i mitten av bobinen.

### 6.1 Mätning 1 – Utan kärna

Detta test görs utan kärna. Lindningen och bobinen kommer endast att ha kontakt med luft. Detta medför en mindre total area för avsvälning och därmed också högre temperaturer än med kärna. Resultaten presenteras i Tabell 6.2 och visualiseras i Figur 6.1.

Tabell 6.2: *Temperaturer vid mätning utan kärna*

Ström [A]	Temperatur [°C]							
	CH0	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7
3	94.3	93.1	95.1	94.0	93.9	87.1	83.9	34.8



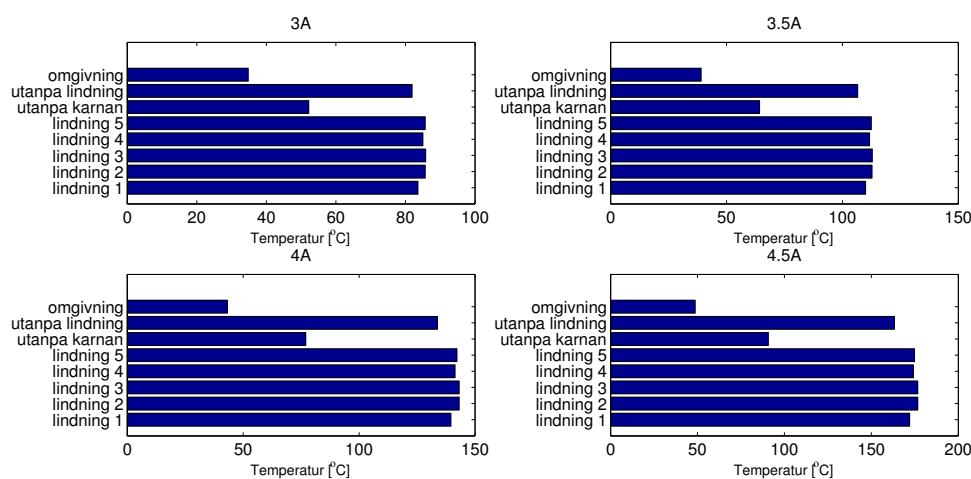
Figur 6.1: *Temperaturer vid mätning utan kärna vid 3A*

### 6.2 Mätning 2 – Med kärna

I dessa mätningar är transformatorn komplett med kärna. Kärnan leder bort värmen från mitten av bobinen ut till luft. Kärnan fungerar alltså som en kylfläns vilket sänker lindningarnas temperatur jämfört med mätning 1 vid samma strömstyrka. Resultaten presenteras i Tabell 6.3 och visualiseras i Figur 6.2.

Tabell 6.3: *Temperaturer vid mätning med kärna vid olika strömstyrkor*

Ström [A]	Temperatur [°C]							
	CH0	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7
3	83.6	85.7	85.8	85.0	85.7	52.2	81.9	34.8
3.5	110.0	112.8	112.9	111.7	112.5	64.3	106.6	39.1
4	139.6	143.2	143.2	141.4	142.2	77.0	133.8	43.2
4.5	172.0	176.7	176.7	174.2	174.8	90.8	163.3	48.7



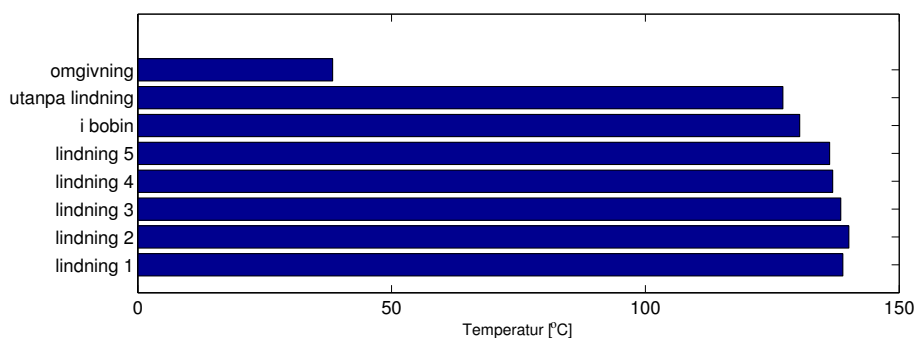
Figur 6.2: *Temperaturer vid mätning med kärna vid olika strömstyrkor*

### 6.3 Mätning 3 – Utan kärna med isolerade sidor av bobin

Detta test utförs för att försöka tvinga all värme att lämna mätobjektet genom lindningens yta. Resultaten presenteras i Tabell 6.4 och visualiseras i Figur 6.3.

Tabell 6.4: *Temperaturer vid mätning med isolerade sidor vid 3.5 A*

Ström [A]	Temperatur [°C]							
	CH0	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7
3.5	138.9	140.1	138.5	136.9	136.3	130.4	127.1	38.4



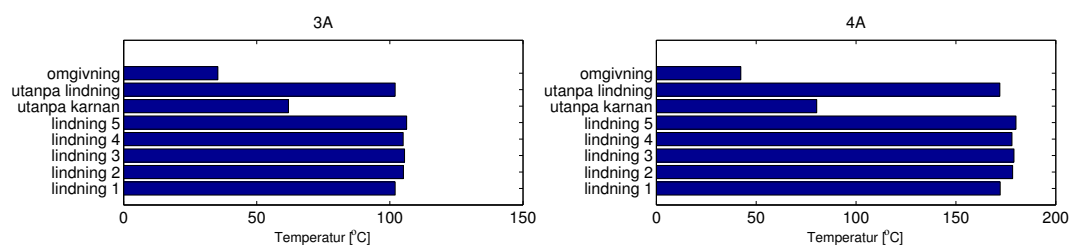
Figur 6.3: *Temperaturer vid mätning med isolerade sidor vid 3.5A*

## 6.4 Mätning 4 – Med kärna och isolerad lindning

Detta test utförs för att försöka tvinga all värme att lämna mätobjektet genom kärnans yta. Resultaten presenteras i Tabell 6.5 och visualiseras i Figur 6.4.

Tabell 6.5: *Temperaturer vid mätning med isolerad lindning vid 3 och 4 A*

Ström [A]	Temperatur [°C]							
	CH0	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7
3	102.0	105.1	105.5	105.0	106.3	61.9	102.0	35.4
4	172.2	178.4	179.1	178.1	180.1	80.3	172.0	42.3



Figur 6.4: *Temperaturer vid mätning med isolerad lindning vid 3 och 4 A*

## 7 Analys

### 7.1 Inledning

I detta avsnitt beskrivs ett försök att fastställa de termiska resistenserna hos mätobjektet. Analysen utgår från de resultat som erhållits av mätningarna som presenteras i avsnitt 6.

### 7.2 Beräkning av $q$

För att kunna beräkna förlusteffekten  $q$  i de olika lindningsskikten måste resistansen för varje skikt tas fram. Eftersom resistansen i koppar vid mindre längder är mycket låg görs istället mätningar på 100 meter av samma ledartyp. Genom att avläsa spänningen för olika strömmar kan resistansen räknas ut. Resultatet från detta presenteras i Tabell 7.1. Ett medelvärde från dessa mätningar representerar resistansen vid rumstemperatur för 100 meter av aktuell ledare.

Tabell 7.1: *Uträkning av resistans för 100 meter lindningsledare vid rumstemperatur*

Ström[A]	Spänning[V]	Resistans [ $\Omega$ ]
0.500	1.539	3.078
1.008	3.101	3.076
1.994	6.147	3.083
3.005	9.330	3.105
4.001	12.510	3.121
		$R_{medel} = 3.0944$

Eftersom varje lindningslängd är ännu okänd måste transformatorn lindas upp för att mäta varje lindningsskikt. När längden för varje skikt är känd kan således resistansen vid rumstemperatur för varje skikt beräknas enligt

$$R_{skikt} = \frac{l_{skikt}}{100[\text{m}]} R_{medel} \quad (7.1)$$

Resultatet presenteras i Tabell 7.2. Rådande rumstemperatur vid utförda tester var 23.8 °C.

Tabell 7.2: *Resistansen i varje lindningsskikt vid rumstemperatur*

Skikt	längd [m]	Resistans [ $\Omega$ ]
1	3.6	0.1114
2	3.91	0.1210
3	4.0	0.1237
4	4.3	0.1331
5	4.77	0.1476

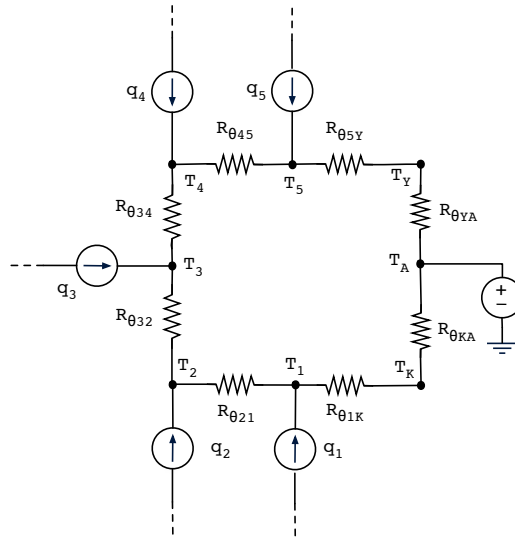
För att beräkna resistansen i ledarna vid de uppmätta temperaturerna, måste kompensering av resistansen göras enligt (2.4), där  $T_A = 23.8^\circ\text{C}$ . Först efter kompenseringen kan förlusteffekten  $q$  beräknas enligt (2.5).

### 7.3 Termisk modell av transformatorn

Här analyseras resultaten från mätningarna utifrån den termiska modell som representeras av Figur 7.1. Modellens olika beteckningar presenteras i Tabell 7.3.

Tabell 7.3: Förklaring av beteckningar i figur 7.1

Förklaring		Förklaring	
$q_1$	Förlusteffekt från lindningsskikt 1	$R_{\theta 12}$	Termisk Resistans mellan $T_1$ och $T_2$
$q_2$	Förlusteffekt från lindningsskikt 2	$R_{\theta 23}$	Termisk Resistans mellan $T_2$ och $T_3$
$q_3$	Förlusteffekt från lindningsskikt 3	$R_{\theta 34}$	Termisk Resistans mellan $T_3$ och $T_4$
$q_4$	Förlusteffekt från lindningsskikt 4	$R_{\theta 45}$	Termisk Resistans mellan $T_4$ och $T_5$
$q_5$	Förlusteffekt från lindningsskikt 5	$R_{\theta 5Y}$	Termisk Resistans mellan $T_5$ och $T_Y$
$T_1$	Temperatur i lindningsskikt 1	$R_{\theta YA}$	Termisk Resistans mellan $T_Y$ och $T_A$
$T_2$	Temperatur i lindningsskikt 2	$R_{\theta 1K}$	Termisk Resistans mellan $T_1$ och $T_K$
$T_3$	Temperatur i lindningsskikt 3	$R_{\theta KA}$	Termisk Resistans mellan $T_K$ och $T_A$
$T_4$	Temperatur i lindningsskikt 4		
$T_5$	Temperatur i lindningsskikt 5		
$T_Y$	Temperatur utanpå lindning		
$T_K$	Temperatur utanpå kärna		
$T_A$	Temperatur i omgivande luft		



Figur 7.1: Termisk modell av mätobjektet.

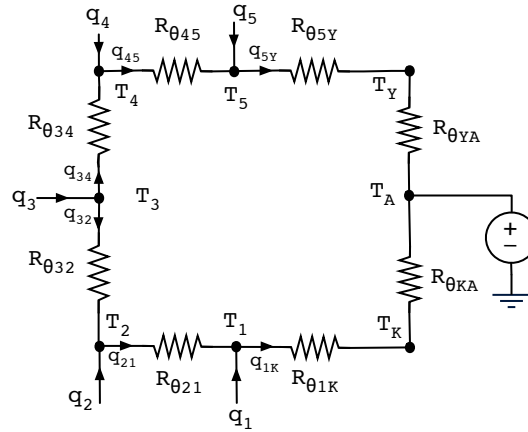
Den termiska resistansen mellan de olika temperaturerna i mätobjektet kan räknas ut enligt

$$R_{\theta} = \frac{\Delta T}{q} \quad (7.2)$$

Där  $\Delta T$  är skillnaden i temperatur mellan punkterna och  $q$  är värmeöverföringsgraden mellan samma punkter.

Antagande görs att temperaturen i lindningsskikt 3 är högst, detta för att få referensriktningar som är nödvändiga för att ställa upp ekvationer för systemet. Samma modell med referensriktningar utplacerade blir enligt Figur 7.2 nedan. För att dessa riktningar skall stämma måste följande villkor vara sant:

$$(T_3 > T_2 > T_1 > T_K > T_A) \wedge (T_3 > T_4 > T_5 > T_Y > T_A) \quad (7.3)$$



Figur 7.2: Termisk modell av transformator med utgångspunkt att lindningsskikt 3 har högst temperatur.

Då endast strömmarna  $q_1 - q_5$  är kända tillämpas Kirchoff's strömlag i varje punkt  $T_x$ , som säger att summan av alla ingående strömmar i en punkt är lika med summan av utgående strömmar från samma punkt. Följaktligen kan följande samband ställas upp;

$$q_{21} = q_2 + q_{32} \quad (7.4)$$

$$q_{32} = q_3 - q_{34} \quad (7.5)$$

$$q_{45} = q_4 + q_{34} \quad (7.6)$$

$$q_{5Y} = q_5 + q_{45} \quad (7.7)$$

$$q_{1K} = q_1 + q_{21} \quad (7.8)$$

Totalt fem ekvationer och sex okända variabler medför ett underbestämt system. Alltså måste minst en variabel bestämmas på ett annat vis innan ovanstående modell kan lösas numeriskt.

## 7.4 Isolerad lindning

I ett försök att manipulera den termiska resistansen  $R_{\theta YA}$  läggs ett lager med isolerande material runt lindningen. Isolermaterialet är glasfiberull som hålls på plats med vävtejp. Om  $R_{\theta YA}$  skulle bli mycket större än övriga resistanser skulle vi kunna modellera kretsen enligt Figur 7.3. Målet är att värmeöverföringen  $q_{5Y}$  skall bli lika med 0 genom att  $T_5 = T_Y$ . På så sätt kan alla övriga  $q$  räknas ut med Kirchoff's strömlag. En förutsättning är dock att (7.9) är uppfyllt.

$$T_Y = T_5 \geq T_4 \geq T_3 \geq T_2 \geq T_1 \geq T_K \geq T_A \quad (7.9)$$

Mätresultaten i avsnitt 6.4 visar emellertid att temperaturerna inte överensstämmer med villkoret i (7.9) ty  $T_4 < T_3$  samt  $T_Y < T_5$ . Detta medför att  $q_{5Y} \neq 0$ , alltså kan denna metod inte användas för att bestämma värmeflödena och i förlängningen också de termiska resistenserna.

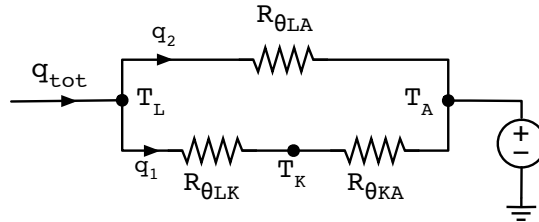


## 7.6 Förenkling

Från resultaten i avsnitt 6 kan det konstateras att temperaturskillnaden mellan de olika lindnings-skikten är förhållandevis liten. Detta möjliggör en approximativ modellering där samtliga skikt tillsammans betraktas som en enhet.

### 7.6.1 Förenklad modell

Denna modell fokuserar på de mest dominant termiska resistanserna vilka ger upphov till de största temperaturskillnaderna (Figur 7.7). Genom att medelvärdesbilda samtliga lindningars temperaturer erhålls  $T_L$ .

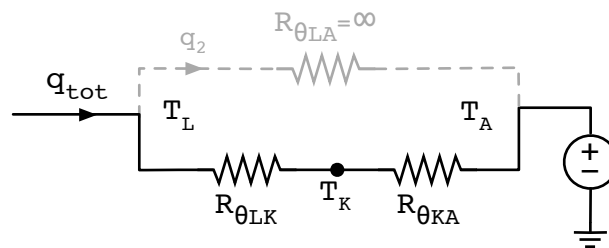


Figur 7.7: Termisk modell av mätobjektet med de mest signifikanta termiska resistanserna, där:

- $q_{tot}$  är den totala förlusteffekten
- $q_1$  är värmeförlusten som lämnar objektet genom kärnans yta
- $q_2$  är värmeförlusten som lämnar objektet genom lindningens yta
- $R_{\theta LA}$  är den termiska resistansen mellan lindningen och omgivningstemperaturen
- $R_{\theta LK}$  är den termiska resistansen mellan lindningen och kärnan
- $R_{\theta KA}$  är den termiska resistansen mellan kärnan omgivningstemperaturen

### 7.6.2 Beräkning av $R_{\theta LK}$ och $R_{\theta KA}$

Med samma resonemang som i avsnitt 7.4 modelleras mätobjektet enligt Figur 7.8 för att kunna beräkna  $R_{\theta LK}$  och  $R_{\theta KA}$ . I dessa beräkningar görs antagandet att kärnans yttemperatur är homogen och att all värmeöverföring från lindningarna till omgivningen sker via kärnan.



Figur 7.8: Förenklad modell av mätobjektet då lindningen är isolerad

Då  $q_{tot}$  beräknas enligt 2.5 och temperaturerna  $T_L$ ,  $T_K$  och  $T_A$  är kända från mätning 4 ( $I = 3A$ ) i avsnitt 7.4 kan de termiska resistanserna  $R_{\theta LK}$  och  $R_{\theta KA}$  beräknas enligt

$$R_{\theta LK} = \frac{T_L - T_K}{q_{tot}} \quad (7.11)$$

$$R_{\theta KA} = \frac{T_K - T_A}{q_{tot}} \quad (7.12)$$

### 7.6.3 Beräkning av $q_2$ och $R_{\theta LA}$

Genom att applicera de beräknade termiska resistanserna från (7.11) och (7.12) till modellen i Figur 7.7 kan nu  $q_2$  och  $R_{\theta LA}$  beräknas enligt

$$q_1 = \frac{T_L - T_A}{R_{\theta LK} + R_{\theta KA}} \quad (7.13)$$

$$q_2 = q_{tot} - q_1 \quad (7.14)$$

$$R_{\theta LA} = \frac{T_L - T_A}{q_2} \quad (7.15)$$

Resultaten från beräkningar presenteras i Tabell 7.4 nedan. Antagande görs att  $R_{\theta LK}$  och  $R_{\theta KA}$  är konstanta.

Tabell 7.4: Uppmätta temperaturer, beräknade termiska resistanser samt elektrisk resistans för lindningen

Ström [A]	$T_L$ [°C]	$T_K$ [°C]	$T_A$ [°C]	$R_{\theta LK}$ [°C/W]	$R_{\theta KA}$ [°C/W]	$R_{\theta LA}$ [°C/W]	$R_{lindning}$ [ $\Omega$ ]
3	85.2	52.2	34.8	5.6759	3.5061	30.8931	0.7905
3.5	112.0	64.3	39.1	5.6759	3.5061	28.3673	0.8577
4	141.9	77.0	43.2	5.6759	3.5061	23.6748	0.9326
4.5	174.9	90.8	48.7	5.6759	3.5061	18.5211	1.0151
$R_{\theta LAmedel} = 25.36$							

Detta ger att  $T_A$  och  $R_{lindning}$  varierar utifrån erhållna mätresultat. För båda dessa variabler skapas varsin anpassad funktion av strömmen enligt

$$R_{lindning}(I) = 0.0153I^2 + 0.03499I + 0.5478 \quad (7.16)$$

$$T_A(I) = 1.2I^2 + 0.16I + 23.6 \quad (7.17)$$

För  $R_{\theta LA}$  skapas ett medelvärde för att användas i vidare beräkningar enligt Tabell 7.4.

Ett annat sätt att beräkna de termiska resistanserna vore att med hjälp av mätning 3 bestäma  $R_{\theta LA}$ . Hela den resistiva förlusteffekten från lindningarna flödar då genom lindningen till omgivningsluften.  $R_{\theta LA}$  blir då således

$$R_{\theta LA} = \frac{T_L - T_A}{q_{tot}} \quad (7.18)$$

Utifrån  $R_{\theta LA}$  kan sedan resterande resistanser bestämmas analogt med (7.13), (7.14) och (7.18). Resistansen  $R_{\theta LA}$  blir 7.8474 [°C/W] med värden från mätning 3. Vid jämförelse med  $R_{\theta LAmedel}$  ut tabell 7.4 noteras stora avvikelser. Vid fortsatta beräkningar kommer  $R_{\theta LAmedel}$  att användas, då det upplevs att förutsättningarna för en effektiv isolering är bättre då lindningen isoleras enligt mätning 4 i avsnitt 6.4.

### 7.6.4 Verifikation av förenklad modell mot mätning 2

Ur figur 7.7 erhålls att

$$T_L = T_A + q_1(R_{\theta KA} + R_{\theta LK}) \quad (7.19)$$

$$T_K = T_A + q_1 R_{\theta KA} \quad (7.20)$$

där:

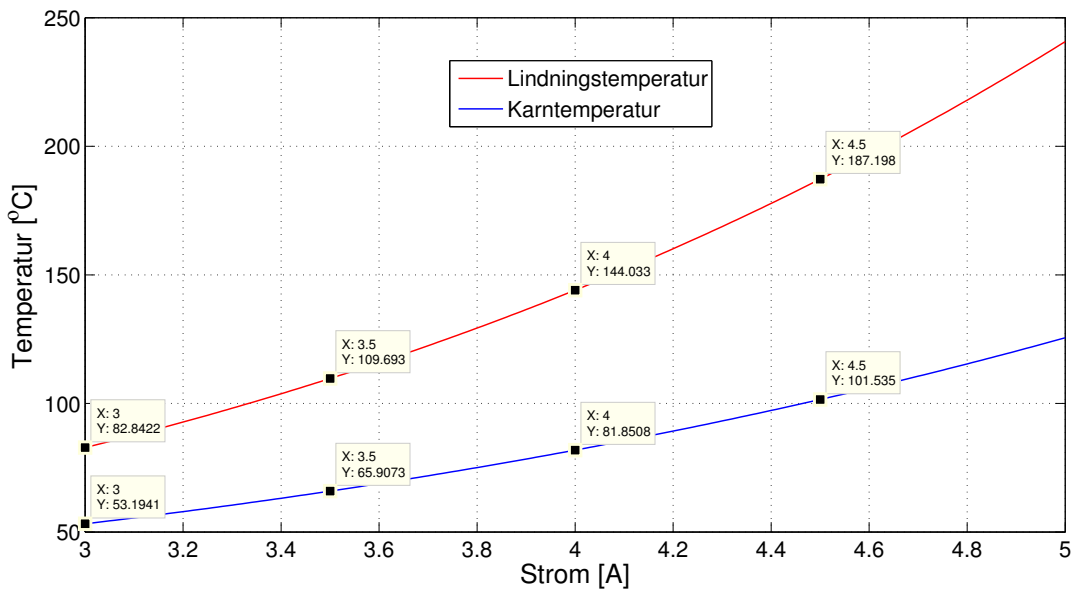
$$q_1 = q_{tot} \frac{R_{\theta LA}}{R_{\theta LA} + R_{\theta KA} + R_{\theta LK}} \Rightarrow q_1(I) = R_{lindning}(I) I^2 \frac{R_{\theta LAmedel}}{R_{\theta LAmedel} + R_{\theta KA} + R_{\theta LK}} \quad (7.21)$$

Genom att kombinera (7.21) med (7.19) och (7.20) erhålls ekvationer för  $T_L$  och  $T_K$  som funktion av strömmen  $I$ .

$$T_L(I) = T_A(I) + \underbrace{R_{lindning}(I) I^2}_{q_{tot}} \underbrace{\frac{R_{\theta LAmedel}}{R_{\theta LAmedel} + R_{\theta KA} + R_{\theta LK}}}_{q_1} (R_{\theta KA} + R_{\theta LK}) \quad (7.22)$$

$$T_K(I) = T_A(I) + R_{lindning}(I) I^2 \frac{R_{\theta LAmedel}}{R_{\theta LAmedel} + R_{\theta KA} + R_{\theta LK}} R_{\theta KA} \quad (7.23)$$

I Figur 7.9 visas temperaturfunktionerna  $T_L(I)$  och  $T_K(I)$  vid jämviktstillstånd.



Figur 7.9: Mätobjektets temperatur/strömkaraktäristik

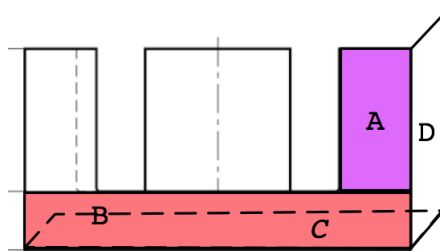
Dessa modellerade värden jämförs nu med uppmätta värden för samma strömmar i Tabell 7.5.

Tabell 7.5: Jämförelse mellan uppmätta och modellerade värden från mätning 2

Ström[A]	$T_{Lmät}$	$T_{Lmod}$	Fel [%]	$T_{Kmät}$	$T_{Kmod}$	Fel [%]
3	85.2	82.8	2.8	52.2	53.2	1.9
3.5	112.0	109.7	2.1	64.3	65.9	2.5
4	141.9	144.0	1.5	77.0	81.9	6.4
4.5	174.9	187.2	7	90.8	101.5	11.8

### 7.6.5 Termisk resistans per ytenhet

När de termiska resistanserna är fastställda bestäms den termiska resistansen per ytenhet för de delar som har kontakt med omgivningstemperaturen. I Figur 7.10 visas en kärnhalsa [6] med markerade fält för uträkning av ytarea.

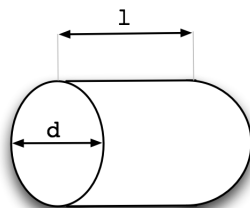


Figur 7.10: En kärnhalsa med markerade fält för areaberäkning

Genom att mäta dessa sträckor kan sedan den totala ytarean mot luft för kärnan beräknas enligt

$$A_{ytaK} = 2(4A + 2B + C + 2D) = 9.1127 \times 10^{-3} [m^2] \quad (7.24)$$

Även arean för lindningen beräknas. Figur 7.11 visar en skiss över lindningens yta.



Figur 7.11: Skiss av lindningens yta

Arean på lindningen bestäms efter uppmätta dimensioner enligt:

$$A_{ytaL} = d\pi l = 35 \times 10^{-3} \times \pi \times 41 \times 10^{-3} = 4.51 \times 10^{-3} [m^2] \quad (7.25)$$

Den termiska resistansen per ytenhet beräknas sedan enligt

$$R_{\theta ytaK} = \frac{R_{\theta KA}}{A_{ytaK}} = \frac{3.5061}{0.0091127} = 384.75 [^{\circ}C/W/m^2] \quad (7.26)$$

$$R_{\theta ytaL} = \frac{R_{\theta LA}}{A_{ytaL}} = \frac{25.36}{0.00451} = 5625.32 [^{\circ}C/W/m^2] \quad (7.27)$$

## 8 Resultat

Den metod som använts med avseende på Pt1000-givare och den krets som är uppbyggd har fungerat bra och denna metod känns solid för ändamålet. Mycket tid har lagts på att skapa en så exakt kalibrering som möjligt, och detta visade sig vara inte helt okomplicerat. Som nämnts i avsnitt 5 har tre olika kalibreringsmetoder prövats varpå "Metod 3" blev den slutgiltiga. Kalibreringen visade sig vara oerhört central för att erhålla tillförlitliga mätresultat. Enligt avsnitt 5.5 där samtliga mätkanaler testas mot den externa temperaturmätare som använts vid kalibreringen erhålls en temperaturskillnad mellan två kanaler av ca: 0.2 °C. Detta anser vi vara tillräckligt bra för att utföra tester på mätobjektet och lita på resultaten.

Flertalet olika mätningar har gjorts, beskrivna i avsnitt 6, men då erhållna mätresultat inte uppfyller uppställda villkor för den mer omfattande termiska modellen kan inga beräkningar utföras med denna modell. Istället utformades en förenklad modell som bygger på att skillnaderna mellan lindningstemperaturerna är tillräckligt små för att dessa skall kunna betraktas som en temperatur. Utifrån denna modell har de termiska resistanserna fastställts. Modellen har sedan testats mot uppmätta värden och uppvisat en största avvikelse på 11.8 %.

### 8.1 Framtida arbete

Det finns ett antal punkter som vi tror är viktiga för att förbättra mätsystemet i framtiden. Beträffande transformatorn så skulle det vara fördelaktigt att utföra mätningarna på en större version av geometrin. Detta för att minska motståndstermometrarnas påverkan på lindningens form. Det hade även varit önskvärt att ha tillgång till ytterligare mätkanaler för att kunna registrera temperaturen på fler punkter, bland annat en ytterligare givare per lindningsskikt samt fler mätpunkter över kärnans yta. På sådant vis hade det varit möjligt att få en bättre bild av temperaturerna.

Trots att vår använda kalibreringsmetod gav bra resultat skulle mer energi kunna spenderas på att skapa en ännu bättre kalibreringsmetod. Det är av yttersta vikt att varje givare omges av exakt samma temperatur då respektive kanals spänning registreras för den temperaturen. För att åstadkomma detta krävs en mycket homogen miljö där alla givare inklusive referenstermometern är placerade. Detta bör vara ett slutet kärl med konstant omrörning för att hela tiden fördela temperaturen jämnt. Kärlet bör även bara mycket bra isolerat för att hindra temperaturen att sjunka för snabbt. Referenstermometer bör vara av hög kvalitet för att säkerställa att temperaturnivåerna är korrekta.

## Referenser

- [1] Motståndstermometer PT1000  
[https://www1.elfa.se/data1/wwwroot/assets/datasheets/qcJUM0-Platin-Chip-tempsensoren\\_e.pdf](https://www1.elfa.se/data1/wwwroot/assets/datasheets/qcJUM0-Platin-Chip-tempsensoren_e.pdf), sidan 7.
- [2] H. Wayne Beaty, Donald G. Fink, "Resistors and resistance", ur *Standard Handbook for Electrical Engineers, Sixteenth Edition*, McGraw-Hill 2013, avsnitt 2.5.4
- [3] Lars Bengtsson, "Temperaturgivare", ur *"Elektriska mätsystem och mätmetoder"*, Studentlitteratur (2001, 2003), upplaga 2:3, avsnitt 2.5.1, sid 35-36.
- [4] A. Bossche & V. C. Vakhev, "Thermal Aspects", ur *"Inductors and transformers for power electronics"*, Taylor & Francis, 2005, avsnitt 6.2.
- [5] Instrumentförstärkare ina122,  
[https://www1.elfa.se/data1/wwwroot/assets/datasheets/vxINA122\\_e.pdf](https://www1.elfa.se/data1/wwwroot/assets/datasheets/vxINA122_e.pdf)
- [6] Ferrites and accessories, ETD 59/31/22 Core and accessories,  
<http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/0876/0900766b8087641d.pdf>
- [7] DOW CORNING® 340 Heat sink compound,  
[https://www1.elfa.se/data1/wwwroot/assets/datasheets/dc340\\_eng\\_tds.pdf](https://www1.elfa.se/data1/wwwroot/assets/datasheets/dc340_eng_tds.pdf)
- [8] Krympslang 1.2 mm, 2.4 mm,  
[https://www1.elfa.se/data1/wwwroot/assets/datasheets/F-175\\_eng\\_tds.pdf](https://www1.elfa.se/data1/wwwroot/assets/datasheets/F-175_eng_tds.pdf)
- [9] Isoleringstejp 12 mm x 33 m,  
<https://www1.elfa.se/data1/wwwroot/assets/datasheets/08090707.pdf>

# Appendix

## Bilaga 1

```
1 % Kurvanpassning, inläsning av text-fil samt grafisk presentation av temperaturer.
2
3 clear all
4 close all
5 clc
6
7 % Kalibreringstemperaturer:
8 T=[194.2; 183.1; 180; 177.1; 173.2; 170.1; 164.6; 158.7; 148.1; 144.0; 136.4; ...
    131.7;125; 118.3; 109.9;102; 94.8; 86.1; 81.1; 75.8; 64; 58; 52.8; 47.5; 42.1; ...
    37.5; 34.3;];
9
10 % Spänning från respektive kanal vid kalibreringstemperaturer:
11
12 CH0=[3.344194; 3.203159; 3.162729; 3.125034; 3.073923; 3.032883; 2.959971; 2.881062; ...
    2.736821; 2.680742; 2.571765; 2.504851; 2.406592; 2.307346; 2.177363; 2.051934; ...
    1.936038; 1.789497; 1.704031; 1.614587; 1.404600; 1.288809; 1.185977; 1.086462; ...
    0.976636; 0.881125; 0.812607;];
13 CH1=[3.342336; 3.200129; 3.159392; 3.123198; 3.071731; 3.031072; 2.959045; 2.880742; ...
    2.735735; 2.679451; 2.570498; 2.504280; 2.405698; 2.306960; 2.175264; 2.050818; ...
    1.934121; 1.789111; 1.703948; 1.613850; 1.406125; 1.289175; 1.183723; 1.083975; ...
    0.973652; 0.878699; 0.812766;];
14 CH2=[3.337473; 3.196716; 3.155037; 3.118198; 3.066323; 3.025950; 2.954072; 2.874822; ...
    2.729402; 2.675239; 2.565720; 2.498970; 2.400320; 2.302905; 2.171270; 2.048293; ...
    1.932781; 1.784390; 1.698967; 1.608894; 1.399150; 1.284060; 1.181694; 1.082830; ...
    0.971804; 0.876465; 0.807974;];
15 CH3=[3.346555; 3.200815; 3.159304; 3.122710; 3.074609; 3.030188; 2.958860; 2.879626; ...
    2.734314; 2.678594; 2.570066; 2.503669; 2.405334; 2.306946; 2.175234; 2.050735; ...
    1.935686; 1.789380; 1.704019; 1.614282; 1.405859; 1.289985; 1.190271; 1.086213; ...
    0.976431; 0.879285; 0.810449;];
16 CH4=[3.344895; 3.199175; 3.158762; 3.121733; 3.069810; 3.029114; 2.956909; 2.878374; ...
    2.734038; 2.676077; 2.568308; 2.500881; 2.402302; 2.304663; 2.173171; 2.047578; ...
    1.931335; 1.787339; 1.701602; 1.612085; 1.402300; 1.285830; 1.178989; 1.086013; ...
    0.976035; 0.881091; 0.814436;];
17 CH5=[3.341516; 3.202056; 3.161638; 3.125063; 3.073855; 3.032356; 2.959954; 2.881086; ...
    2.736387; 2.680737; 2.571494; 2.505100; 2.406941; 2.307722; 2.177095; 2.052119; ...
    1.935742; 1.791228; 1.705183; 1.616064; 1.406296; 1.289172; 1.185969; 1.086025; ...
    0.976401; 0.881274; 0.813015;];
18 CH6=[3.330281; 3.193079; 3.150171; 3.113428; 3.061567; 3.020715; 2.949360; 2.871060; ...
    2.725437; 2.668870; 2.559148; 2.492827; 2.395005; 2.295012; 2.165254; 2.040840; ...
    1.923828; 1.779568; 1.693396; 1.603926; 1.396138; 1.279297; 1.172224; 1.077075; ...
    0.967004; 0.871724; 0.805334;];
19 CH7=[3.336067; 3.193638; 3.154177; 3.117192; 3.066372; 3.025012; 2.953489; 2.873726; ...
    2.729553; 2.673293; 2.563777; 2.497175; 2.399114; 2.300947; 2.170850; 2.045710; ...
    1.930425; 1.787212; 1.699377; 1.611172; 1.399927; 1.285125; 1.178923; 1.085403; ...
    0.974976; 0.880830; 0.812964;];
20
21 % Kurvanpassning till andragsradsfunktion från ovanstående kalibreringspunkter:
22
23 FitCH0=fit(CH0,T,'poly2');
24 FitCH1=fit(CH1,T,'poly2');
25 FitCH2=fit(CH2,T,'poly2');
26 FitCH3=fit(CH3,T,'poly2');
27 FitCH4=fit(CH4,T,'poly2');
28 FitCH5=fit(CH5,T,'poly2');
29 FitCH6=fit(CH6,T,'poly2');
30 FitCH7=fit(CH7,T,'poly2');
31
32 % Inläsning av text-fil med sampel från mättningsprogrammet i Labview:
33
34 load('filnamn.lvm')
35
36 % Extraktion av varje kanals spänningsvärden för placering i varsin vektor:
37
38 kanal0=filnamn(:,1);
```

```

39 kanal1=filnamn(:,2);
40 kanal2=filnamn(:,3);
41 kanal3=filnamn(:,4);
42 kanal4=filnamn(:,5);
43 kanal5=filnamn(:,6);
44 kanal6=filnamn(:,7);
45 kanal7=filnamn(:,8);
46
47 % Skapar tidsvektor från antal sampel i en kolumn i txt-filen:
48
49 x1=0:length(kanal0)-1;
50
51 % Spänningsvärdena från respektive kolumn i txt-filen
52 % körs genom den anpassade kurvans funktion:
53
54 y0=FitCH0(kanal0);
55 y1=FitCH1(kanal1);
56 y2=FitCH2(kanal2);
57 y3=FitCH3(kanal3);
58 y4=FitCH4(kanal4);
59 y5=FitCH5(kanal5);
60 y6=FitCH6(kanal6);
61 y7=FitCH7(kanal7);
62
63 % Rita graf över samtliga kanalers temperaturstigning:
64
65 plot(x1,y0,'m',x1,y1,'c',x1,y2,'r',x1,y3,'g',x1,y4,'b',...
        x1,y5,'k',x1,y6,'—k',x1,y7,'—b'), grid
66 legend('CH0','CH1','CH2','CH3','CH4','CH5','CH6','CH7')
67 xlabel('tid [s]','fontsize',18)
68 ylabel('temperatur [^\oC]','fontsize',18)
69 set(gca,'FontSize',14) % axlar

```

## Bilaga 2

```
1
2 % Tar fram den resistansen för lindningen vid mättemperatur.
3
4 clc
5 clear all
6
7 alpha = 0.00393; %Temperaturkoefficient för koppar
8 T0=23.8; % Omgivningstemperatur
9
10 % För 100 m ledare:
11
12 R05 = 3.078; % Vid I=0.5A
13 R1 = 3.0764; % Vid I=1.008A
14 R2 = 3.0827; % Vid I=1.994A
15 R3 = 3.1048; % Vid I=3.005A
16 R4 = 3.1213; % Vid I=4.008A
17 R5 = 3.1037; % Vid I=5.081A
18
19 R_100 = mean([R05 R1 R2 R3 R4 R5]); % Genomsnitt
20
21 % Skikt längd:
22
23 l1=3.6;
24 l2=3.91;
25 l3=4.0;
26 l4=4.3;
27 l5=4.77;
28
29 % Skikt resistans:
30
31 R01=(l1/100)*R_100;
32 R02=(l2/100)*R_100;
33 R03=(l3/100)*R_100;
34 R04=(l4/100)*R_100;
35 R05=(l5/100)*R_100;
36
37 prompt = 'Temperatur i skikt 1?';
38 T1 = input(prompt);
39 prompt = 'Temperatur i skikt 2?';
40 T2 = input(prompt);
41 prompt = 'Temperatur i skikt 3?';
42 T3 = input(prompt);
43 prompt = 'Temperatur i skikt 4?';
44 T4 = input(prompt);
45 prompt = 'Temperatur i skikt 5?';
46 T5 = input(prompt);
47
48 RT1 = R01*(1+alpha*(T1-T0));
49 RT2 = R02*(1+alpha*(T2-T0));
50 RT3 = R03*(1+alpha*(T3-T0));
51 RT4 = R04*(1+alpha*(T4-T0));
52 RT5 = R05*(1+alpha*(T5-T0));
53
54 R=RT1+RT2+RT3+RT4+RT5
55
56 prompt = 'Ström?';
57 I = input(prompt);
58
59 Power_loss = R*I.^2
60 fprintf('resistanserna:\n')
61 RT1
62 RT2
63 RT3
64 RT4
65 RT5
```

