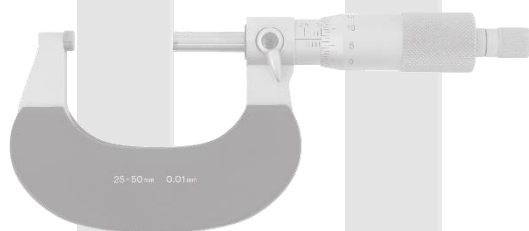


TEMPERATURMÅLING VED HJÆLP AF ELEKTRISK TER- MOSPÆNDING

UNDERVISNINGSELEMENT

T3

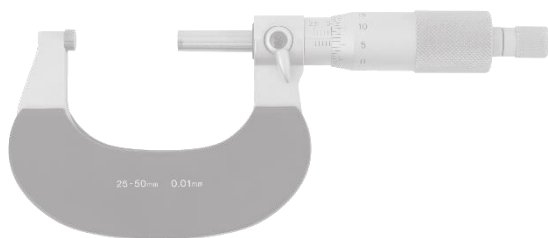
—
UNDERVISNING
I MÅLETEKNIK



TEMPERATURMÅLING VED HJÆLP AF ELEKTRISK TERMOSPÆNDING

Kasper Jønck, FORCE Technology

1. udgave – Oktober 2017, redigeret oktober 2019



Copyright © 2017 metrologi.dk – Materialet må ikke anvendes til kommercielt brug, uden tilladelse fra metrologi.dk.

Metrologi.dk er finansieret af Styrelsen for Forskning og Innovation i perioden 2016 – 2018. Materiale er udarbejdet i et samarbejde mellem GTS-institutterne DFM A/S, FORCE Technology og DELTA - a part of FORCE Technology.

Læs mere om projektet på www.metrologi.dk.

Parterne i Metrologi.dk kan ikke gøres ansvarlig for fejl og mangler i indholdet af undervisningsmaterialet eller i indholdet på websitet, samt indholdet i de eksterne dokumenter og websites, der linkes til, medmindre andet følger af dansk rets almindelige regler.

Grafisk design af: Henriette Schäfer Høyrup og David Balslev-Harder.

Contents

1 Indledning	1
2 Termoelementer.....	2
Boks 1: Anvendelse af termoelementer.....	2
Boks 2: Seebecks opdagelse	3
Boks 3: Eksempel – Bestemmelse af temperaturforskel og temperatur for et simpelt termoelement	5
Boks 4: Termoelementer som energikilde	5
3 Temperaturbestemmelse med termoelementer.....	6
Boks 5: Kalibreringspolynomier	7
3.1 Temperaturmåling med $T_r=0^{\circ}\text{C}$	7
3.2 Temperaturmåling med $T_r \neq 0^{\circ}\text{C}$.	7
Boks 6: Eksempel – Temperaturbestemmelse med tabelopslag.....	8
4 Praktiske aspekter ved målinger	10
4.1 Måleforhold	10
4.2 Termoelementtype	10
4.3 Installation	10
Boks 7: Reaktionsid	11
4.4 Kabling.....	11
4.5 Referencetemperatur	11
4.6 Spændingsmåling og konvertering	12
5 Typer af termoelementer	13
5.1 Valg af type	14
6 Sammenligning med andre målemetoder.....	15
7 Fejlkilder	16
7.1 Ny kalibrering.....	16
8 Lidt termoelektrisk teori	17
9 Supplerende info.....	19
10 Opsummering	20
10.1 Læringsudbytte	20
10.2 Lærings spørgsmål	20
10.3 Niveau og omfang	20

1 Indledning

I dette kompendium T3 introduceres den studerende til grundlæggende information om temperaturmåling ved hjælp af elektrisk termospænding.

Ved denne type måling bruges der en føler, der kaldes et termoelement. Et termoelement består kort fortalt af to isolerede elektriske ledere af forskellige materialer, der er samlet i den ene ende. Da de elektriske ledere på denne måde er koblet sammen, kaldes disse følere derfor også for termokoblinger eller termokobler.

Termoelementer er simple at konstruere, billige og meget velegnede til nogle anvendelser, for eksempel ved måling af meget høje temperaturer.

I løbet af dette kompendie gennemgås grundlæggende viden om termoelementer, praktisk information om anvendelsen af termoelementer til temperaturmåling, de forskellige typer af industrielle termoelementer samt potentielle fejlkilder i målinger og kalibreringer af termoelementer.

Det teoretiske grundlag for termospændinger vil også blive gennemgået.

2 Termoelementer

Måling af temperaturer har utallige anvendelser i industrien, videnskaben og selv det daglige liv.

Temperaturmåling foregår oftest ved en direkte måling, hvor en temperatursensor er i kontakt med målemidiet. Der kan således ikke måles uden at påvirke mediet, og for at få en god måling forudsættes det

- at sensoren ikke udveksler varme med andre kilder;
- at sensoren og mediet har haft termisk kontakt i tilstrækkelig tid, således at der er dannet ligevægt.

Der findes forskellige måleprincipper for direkte temperaturmålinger. De kan deles op i mekaniske målinger (f.eks. kviksølvstermometeret) og elektriske målinger.

Elektriske temperaturmålinger kan være baseret på forskellige fysiske effekter som for eksempel:

- Modstandsændringer
- Termospændinger
- Diodespændingsfald
- Transistorspændingsfald
- Frekvensændringer

De to mest udbredte målemetoder i industrien er måling ved hjælp af modstandstermometre, som benytter sig af modstandsændringer, og måling ved hjælp af termoelementer, som benytter sig af termospændinger.

Temperaturmålinger ved hjælp af modstandsændringer er dækket i undervisningselementerne T1 og T2.

Et termoelement konstrueres af to elektrisk ledende materialer, typisk to metaller, der samles i den ene ende, så der opstår termisk og elektrisk kontakt mellem lederne.

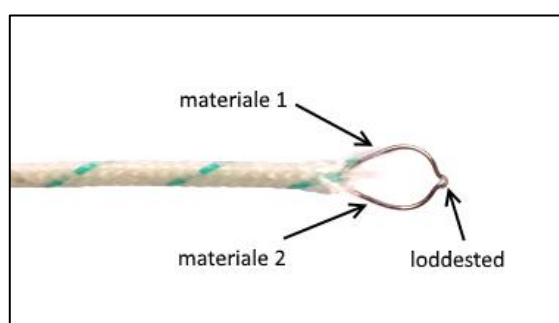
Designet af et termoelement er meget simpelt, og man kan nemt konstruere sit eget med to stykker metaltråd (af forskellige metaller), hvor to af enderne snos om hinanden.

Samlingspunkterne mellem de valgte materialer kaldes typisk for loddesteder, selvom det også kan være

en svejsning (typisk for kommercielle termoelementer) eller en simpel kontakt som f.eks. en snoning.

Figur 1 viser samlingen på et kommercielt termoelement. Når denne samling af de to ledere udsættes for en højere eller lavere temperatur end de løse ender, produceres der en målbar spænding, der er afhængig af temperaturforskellen mellem samlingen og de løse ender. Baseret på denne spænding kan temperaturforskellen bestemmes.

Det er dog vigtigt at påpege, at et termoelement i dens simpleste form kun kan bruges til at bestemme en temperaturforskel. For at bestemme den absolutte



Figur 1: Et kommercielt fremstillet termoelement. De to materialer er elektrisk isoleret undtaget ved loddestedet.

temperatur kræver det en kendt reference temperatur. Dette uddybes i afsnit 3.

Boks 1: Anvendelse af termoelementer

Termoelementer er sandsynligvis den mest udbredte temperaturmålemetode i verden og anvendes i mange forskellige områder i både den industrielle og den private verden.

De bruges bl.a. inden for olie & gas, i kemisk, farmaceutisk og bioteknologisk produktion, i fødevarerbranchen, i cementproduktion, ved forbrændingsprocesser og i rumfarten. I det daglige liv kan man støde på termoelementer i komponenter såsom komfurer, brødrister, gasfyr, grill og vandvarmere.

For at få en dybere forståelse af termoelementer giver det mening at gå tilbage til opdagelsen af termospændinger, som er grundlaget for termoelementet.

I 1821 forsøgte en estisk-tysk fysiker ved navn Thomas Johann Seebeck at opfinde et tørbatteri og eksperimenterede med kombinationer af forskellige metaller. Han opdagede, at et lukket kredsløb bestående af to forskellige metaller genererer en strøm, når de to loddesteder, der forbinder metallerne, holdes på forskellige temperaturer.

Fra Seebecks eksperimenter kan det udledes, at temperaturforskellen genererer en elektromotorisk kraft (spænding), der driver strømmen i kredsløbet.

I mange år antog man, at den elektromotoriske kraft genereres i samlingen mellem de to materialer. Det er sidenhen blevet påvist, at den elektromotoriske kraft opstår i begge materialer, og at det er en generel effekt i elektrisk ledende materialer, når de udsættes for en temperaturforskel over enderne.

Fænomenet fik passende navnet Seebeck-effekten, men kaldes også somme tider for den termoelektriske effekt. Teorien og baggrunden for Seebeck-effekten er emnet i afsnit 8.

Seebeck-effekten generer meget små, men dog målbare spændinger (typisk i størrelsen fra et par mikrovolt til et par millivolt), som kaldes termospændinger. De har vist sig at afhænge næsten udelukkende af temperaturforskellen og en materialeparameter. Det betyder, at spændingen praktisk talt er uafhængig af

den elektrisk leders fysiske dimensioner såsom tværsnitsareal og længde.

Parameteren, der relaterer temperaturforskellen til den resulterende spænding, er en materialeegenskab

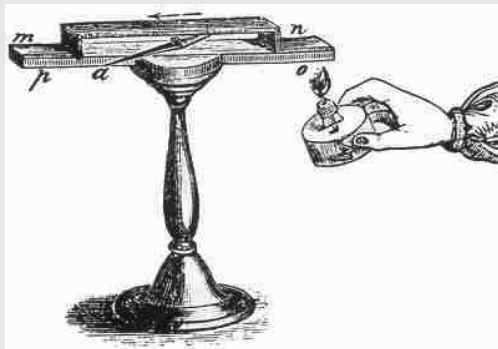
Tabel 1: Seebeck-koefficienter af ofte brugte metaller.

Seebeck-koefficient ved 0 °C	
Materiale	σ [$\mu\text{V}/\text{K}$]
Al	-1,60
Mg	-1,30
Pb	-1,15
Pd	-9,00
Pt	-4,45
Cu	1,70
Ag	1,38
Au	1,79

og afhænger derfor af det valgte ledermateriale. Den kaldes for Seebeck-koefficienten og repræsenteres ofte med tegnet σ (sigma). Tabel 1 viser Seebeck-koefficienterne for en række metaller der ofte bruges til termoelementer.

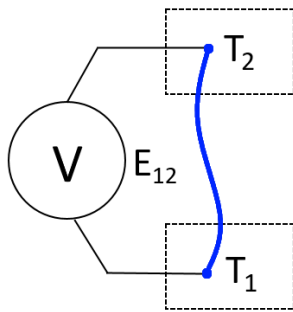
Seebeck-koefficienten er dog ikke en konstant, da dens værdi varierer med temperaturen, og dette medfører, at forholdet mellem temperaturforskellen og spændingen ikke er lineært.

Boks 2: Seebecks opdagelse



De indsatte billeder viser en tegning af Thomas Johann Seebeck (1770-1831) og en skitse af hans eksperiment. Seebeck prøvede at opfinde et tørbatteri og eksperimenterede med kombinationer af forskellige materialer. Han opdagede ved et tilfælde, at en kompasnål (i nærheden af en af lederne) ændrede retning, når en af samlingerne blev koldere eller varmere i forhold til den anden. I modsætning til andre forskere, der arbejdede med lignende forsøg, kontrollerede Seebeck ikke temperaturen i samlingerne i sine forsøg. Dermed blev han, ved et tilfælde, den første til at påvise eksistensen af termoelektricitet.

Da Seebeck-effekten er en generel effekt, kan man forestille sig et idealiseret termoelement, der består af et enkelt stykke metal, hvor den ene placeres i det område, man vil måle temperaturen T_2 , og den anden ende placeres i et område med referencetemperaturen T_1 . En sådan opstilling er skitseret i Figur 2, hvor de stiplede kasser repræsenterer zoner med konstant temperatur.



Figur 2: Et idealiseret termoelement med en enkelt elektrisk leder.

Seebeck-effekten vil inducere en spænding over materialet, der er proportional med temperaturforskellen. Hvis vi antager, at temperaturen T_2 er højere end T_1 , kan forholdet mellem spænding, Seebeck-koefficient og temperatur approksimeres med Ligning 1. I ligningen benyttes $\bar{\sigma}$, som er en middelværdi af Seebeck-koefficienterne ved temperaturerne T_1 og T_2 .

Ligning 1

$$E_{12} = \bar{\sigma}(T_2 - T_1).$$

Ideelt set ville man blot kunne måle den inducerede spænding, men desværre virker denne type opstilling ikke i praksis. Hvis man forbinder et voltmeter for at måle spændingen over lederen, vil Seebeck-effekten også virke i ledningerne der forbinder voltmeteret med lederen, da disse nu også udsættes for en temperaturforskell.

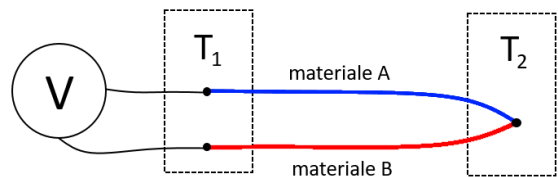
Så den spænding som aflæses på voltmeteret vil være den samlede spænding genereret i lederen og ledningerne til voltmeteret.

Hvis man skulle isolere spændingen fra lederen for at udregne temperaturforskellen, ville det kræve mere viden om systemet.

Man skal blandt andet kende temperaturen ved voltmeteret og Seebeck-koefficienten for ledningerne.

Hver ledning giver et forskelligt bidrag til spændingen, da de udsættes for forskellige temperaturforskelle og forskellige værdier af den temperaturafhængige Seebeck-koefficient.

En mere anvendelig opstilling kan laves ved at kombinere to forskellige ledende materialer. En skitse af denne opstilling kan ses i Figur 3. Dette er et eksempel på et klassisk termoelement som beskrevet tidligere. Ved at kombinere to materialer med forskellige



Figur 3: Et praktisk termoelement med to elektriske ledere.

Seebeck-koefficienter, bliver det muligt at måle den genererede spænding som følge af temperaturforskellen uden at skulle måle i begge temperaturzoner.

Hvis man analyserer kredsløbet på samme måde som tidligere og antagelsen fra Ligning 1, kan man komme frem til følgende sammenhæng mellem den genererede spænding og temperaturforskellen:

Ligning 2

$$\begin{aligned} E_{AB} &= \bar{\sigma}_A(T_2 - T_1) + \bar{\sigma}_B(T_1 - T_2) \\ &= \bar{\sigma}_A(T_2 - T_1) - \bar{\sigma}_B(T_2 - T_1) \\ &= (\bar{\sigma}_A - \bar{\sigma}_B)(T_2 - T_1) \\ &= \bar{\sigma}_{AB}(T_2 - T_1) \end{aligned}$$

I Ligning 2 defineres $\bar{\sigma}_{AB} = (\bar{\sigma}_A - \bar{\sigma}_B)$ som den effektive Seebeck-koefficient for termoelementet. Ofte vælges materialer til termoelementer, så Seebeck-koefficienterne af de to materialer har modsat fortegn. På denne måde kan man øge værdien af den effektive Seebeck-koefficient og dermed den genererede spænding per grad af temperaturforskellen.

Men hvad med bidraget fra voltmeter-ledningerne i denne opstilling? Og hvad hvis der indsættes andre ledninger i kredsløbet?

Man bør ved enhver opstilling analysere kredsløbet for identificere, hvilke elementer der bidrager til spændingen. Heldigvis er bidragene fra hvert element typisk uafhængige og kan blot summeres.

Udtrykkene i Ligning 1 og Ligning 2 er simplificerede, men viser den korrekte sammenhæng og kan fint benyttes, når man kvalitativt skal evaluere de enkelte bidrag.

Fra disse udtryk kan man blandt andet konkludere:

- Hvis materiale A og B er det samme eller har den samme Seebeck-koefficient, vil der ikke blive generet en spænding.
- Hvis der ikke er en temperaturforskul over de to ender på en leder, vil der ikke blive generet en spænding.
- Den generede spænding afhænger kun af temperaturerne på enderne og ikke temperaturerne langs lederen.

For opstillingen i Figur 3 betyder det for eksempel, at der ikke er noget spændingsbidrag fra voltmeterkablerne, hvis temperaturen ved voltmeteret er den samme som T_1 .

Hvis der er en temperaturforskul mellem voltmeteret og T_1 , bør disse medtages. Heldigvis vil disse bidrag typisk udligne hinanden, så længe ledningerne er lavet af samme materiale. Dette skyldes, at den ene ledning vil opleve en temperaturforskul ($T_1 - T_{volt}$), og den anden vil opleve ($T_{volt} - T_1$), hvor T_{volt} er temperaturen af voltmeterledningen.

Termoelementet er altså en aktiv temperaturføler der ikke har behov for en ekstern strømforsyning, da den selv generer en spænding, der blot skal måles. Den konstrueres ved at udnytte en fysisk mekanisme og den egenskab, at mekanismen virker med forskellig styrke i forskellige materialer.

Boks 4: Termoelementer som energikilde

Termoelementer bruges også som energikilde og betegnes som et termobatteri eller en termoelektrisk generator. Dette gøres ved at kombinere flere termoelementer, typisk i serie, for at give en større spænding og forbinde dem til en varmekilde.

På den måde kan man f.eks. generere strøm fra spildvarme og øge effektiviteten af en proces. Det er også en måde at skabe en lokal energikilde, der kan udnyttes til f.eks. målesensorer eller på rumsonder, hvor der benyttes henfaldsvarmen fra radioaktive materialer.

Boks 3: Eksempel – Bestemmelse af temperaturforskul og temperatur for et simpelt termoelement

Dette eksempel viser, hvordan man kan bestemme temperaturforskullen ved hjælp af Ligning 2, hvis man har et simpelt termoelement f.eks. som den opstilling vist i Figur 3.

I dette eksempel antages det, at termoelementet er konstrueret af sølv (Ag) og platin (Pt) som henholdsvis materiale A og B. Det antages også at de målte temperaturer er tæt på 0 °C, således at værdierne for Seebeck-koefficienterne i Tabel 1 er repræsentative. Den effektive Seebeck-koefficient bliver da

$$\bar{\sigma}_{AB} = (\bar{\sigma}_A - \bar{\sigma}_B) \approx (1.38 - (-4.45)) \mu\text{V/K} = 5,83 \mu\text{V/K}$$

Voltmeteret, der er tilsluttet termoelementet, viser en spænding på 233,2 μV . En omskrivning af Ligning 2 og indsættelse af værdierne giver da

$$\Delta T = (T_2 - T_1) = \frac{E_{AB}}{\bar{\sigma}_{AB}} = \frac{233,2 \mu\text{V}}{5,83 \mu\text{V/K}} = 40 \text{ K}$$

Termoelementet registrerer altså en temperaturforskul på 40 K. Hvis man kender temperaturen T_1 , kan man bestemme den målte temperatur. Hvis vi antager $T_1 = 20 \text{ °C}$ fås

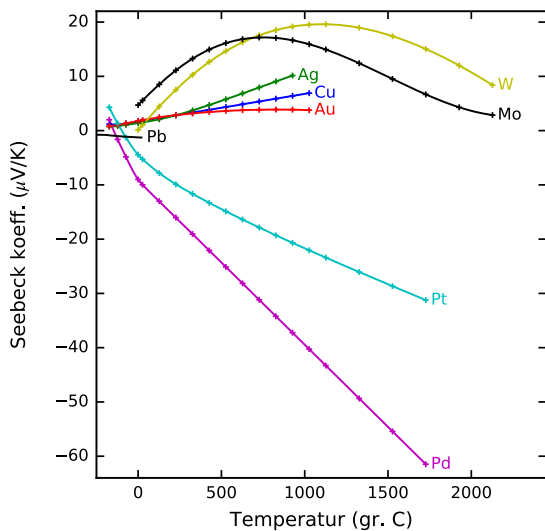
$$T_2 = T_1 + \Delta T = -20 \text{ °C} + 40 \text{ K} = 20 \text{ °C}$$

3 Temperaturbestemmelse med termoelementer

I det foregående kapitel blev de grundlæggende mekanismer og metoder ved brug af termoelementer introduceret. Dog var flere af sammenhængene simplificeret, og bestemmelse af referencetemperatur blev ikke berørt.

Som tidligere nævnt måler et termoelement en temperaturforskul, og for at bestemme den absolutte temperatur kræves der en referencetemperatur, som skal bestemmes ved en anden metode.

Referencetemperatur skal også bruges til at bestemme de korrekte værdier af Seebeck-koefficienterne. Det blev også nævnt tidligere, at Seebeck-koefficienten er temperaturafhængig, og i Figur 4 er koefficienterne for 8 metaller vist som funktion af temperaturen.



Figur 4: Seebeck-koefficienter af forskellige metaller som funktion af temperaturen.

I sidste kapitel blev der anvendt en middelværdi over det relevante temperaturinterval. Desværre er dette kun en god antagelse når Seebeck-koefficienten varierer lineært med temperaturen, og man opererer med meget et lille temperaturspænd.

Den korrekte beskrivelse af forholdet mellem spænding, Seebeck-koefficienter og temperaturer i et termoelement er givet ved

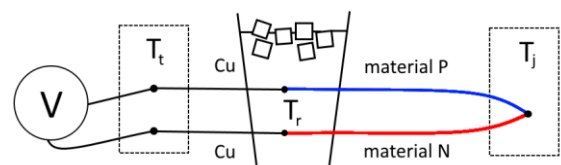
Ligning 3

$$E_{12} = \int_{T_1}^{T_2} \sigma_{PN}(T) dT.$$

I denne notation betegnes Seebeck-koefficienten for termoelementet som $\sigma_{PN}(T)$, der indikerer, at det er en funktion af temperaturen, og hvor notationen PN referer til sammensætningen af en positiv og en negativ leder. For at bestemme den generede spænding skal man altså kunne evaluere integralet over de relevante temperaturgrænser.

Konklusionen er at det er nødvendigt at kende referencetemperatur for at bestemme temperaturen ved loddestedet, både for at sammenholde med den målte temperaturforskul og for at opnå en mere nøjagtig bestemmelse af den inducerede spænding gennem en integration af Seebeck-koefficienten.

En af de første metoder der blev brugt til at bestemme referencetemperatur var ved at nedsænke den "åbne" ende af termoelementet i et isbad som vist i Figur 5. I et isbad har man en blanding af rent vand og is som på sigt vil opnå en ligevægtstemperatur på 0 °C, så længe begge faser er til stede. Et isbad kan derved bruges til at fastlåse referencetemperatur.



Figur 5: Termoelement opstilling med isbad som reference

I praksis er der en række udfordringer, som skal løses for at opnå en konstant temperatur i et isbad. Desuden kan ligevægtstemperaturen ændre sig som følge af f.eks. opløste salte i vandet.

Opstillingen vist i Figur 5 har flere samlinger og ledninger end de tidligere opstillinger. Lederne fra målepositionen til referencepunktet er kobberkabler, som oplever en temperaturforskul fra T_t til T_r . Men som nævnt tidligere vil bidragene fra disse ledere udligne

hinanden og den målte spænding vil kun være bidraget fra selve termoelementet og temperaturforskellen $T_j - T_r$. Spændingen bestemmes derfor af

Ligning 4

$$E_{rj} = \int_{T_r}^{T_j} \sigma_{PN}(T) dT.$$

Når man har fastlåst referencetemperaturen, for eksempel ved brug af et isbad, kan man kalibrere et termoelement ved at udsætte loddestedet for kendte temperaturer og måle spændingen.

Denne direkte sammenhæng mellem spænding og temperaturer gør det muligt at lave temperaturmålinger med termoelementet uden at skulle evaluere integralet i Ligning 4.

Resultatet af kalibreringen bruges enten i kalibreringstabeller, som vist i Figur 6, eller til at tilpasse funktioner, såkaldte kalibreringspolynomier, der kan beskrive sammenhængen.

Hvis man selv konstruerer termoelementer, skal der i princippet udføres en kalibrering for hvert element. For at lette denne proces, specielt for industrielle anvendelser, blev bestemte kombinationer af metaller defineret som standardtyper af termoelementer. Disse standardtyper blev navngivet med et bogstav (J, K, T osv.), og metallerne blev valgt ud fra forskellige egenskaber af det resulterende termoelement. Disse forskellige typer gennemgås nærmere i afsnit 5.

Tabel 2: Koefficienter af kalibreringspolynomier for type J-termoelementer.

Spænding ved $T_r = 0\text{ °C}$		
Koeff.	-210 til 760 °C	760 til 1200 °C
b_0	0,000	$2,965 \times 10^5$
b_1	$5,038 \times 10^1$	$-1,498 \times 10^3$
b_2	$3,048 \times 10^{-2}$	3,179
b_3	$-8,568 \times 10^{-5}$	$-3,185 \times 10^{-3}$
b_4	$1,323 \times 10^{-7}$	$1,572 \times 10^{-6}$
b_5	$-1,705 \times 10^{-10}$	$-3,069 \times 10^{-10}$
b_6	$2,095 \times 10^{-13}$	-
b_7	$-1,254 \times 10^{-16}$	-
b_8	$1,563 \times 10^{-20}$	-

Kombinationen af en fast referencetemperatur og standardtyper af termoelementer giver muligheden for standardkalibreringer, der er tilgængelige for alle.

Boks 5: Kalibreringspolynomier

Kalibreringsdata for termoelementer er tilgængelige som analytiske funktioner, hvor koefficienterne er tilpasset, så de passer til dataene.

Det er oftest højere ordens polynomier, op til 14. grad, der bruges, og de har formen vist nedenunder. Somme tider bruges stykvisse funktioner, der har forskellige koefficienter i forskellige intervaller.

Til hver kalibrering findes to polynomier. Et der giver spændingen som funktion af temperaturen, $F(T_j)$, og den inverse funktion der giver temperaturen som følge af spændingen, $G(E_{0j})$.

$$E_{0j} = F(T_j) = b_0 + b_1 T_j + b_2 T_j^2 + \dots + b_n T_j^n$$

$$T_j = G(E_{0j}) = c_0 + c_1 E_{0j} + c_2 E_{0j}^2 + \dots + c_m E_{0j}^m$$

Disse standardkalibreringer er meget veldefinerede og baseret på mange målinger. Kalibreringsdataene er tilgængelige i tabelform, som vist i Figur 6, eller som kalibreringspolynomier.

3.1 Temperaturmåling med $T_r = 0\text{ °C}$

Ligning 5

$$E_{0j} = \int_0^{T_j} \sigma_{PN} dT$$

Når man har en termoelementopsætning med fast referencetemperatur på 0 °C , er standardkalibreringerne direkte anvendelige, og den målte spænding, E_{0j} , kan bruges til at bestemme temperaturen T_j uden mellemregninger.

Udregningen kan foretages ved hjælp af det inverse polynomium $G(E_{0j})$ eller tabellen.

3.2 Temperaturmåling med $T_r \neq 0\text{ °C}$

Brugen af en fastlåst referencetemperatur ved hjælp af et isbad eller lignende er simpelt til laboratorieforsøg, men er oftest ret upraktisk til industrielle anvendelser, specielt i faste installationer.

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
0	.000	.039	.079	.119	.158	.198	.238	.277	.317	.357	.397	0
10	.397	.437	.477	.517	.557	.597	.637	.677	.718	.758	.798	10
20	.798	.838	.879	.919	.960	1.000	1.041	1.081	1.122	1.162	1.203	20
30	1.203	1.244	1.285	1.325	1.366	1.407	1.448	1.489	1.529	1.570	1.611	30
40	1.611	1.652	1.693	1.734	1.776	1.817	1.858	1.899	1.940	1.981	2.022	40
50	2.022	2.064	2.105	2.146	2.188	2.229	2.270	2.312	2.353	2.394	2.436	50
60	2.436	2.477	2.519	2.560	2.601	2.643	2.684	2.726	2.767	2.809	2.850	60
70	2.850	2.892	2.933	2.975	3.016	3.058	3.100	3.141	3.183	3.224	3.266	70
80	3.266	3.307	3.349	3.390	3.432	3.473	3.515	3.556	3.598	3.639	3.681	80
90	3.681	3.722	3.764	3.805	3.847	3.888	3.930	3.971	4.012	4.054	4.095	90
100	4.095	4.137	4.178	4.219	4.261	4.302	4.343	4.384	4.426	4.467	4.508	100
110	4.508	4.549	4.590	4.632	4.673	4.714	4.755	4.796	4.837	4.878	4.919	110
120	4.919	4.960	5.001	5.042	5.083	5.124	5.164	5.205	5.246	5.287	5.327	120
130	5.327	5.368	5.409	5.450	5.490	5.531	5.571	5.612	5.652	5.693	5.733	130
140	5.733	5.774	5.814	5.855	5.895	5.936	5.976	6.016	6.057	6.097	6.137	140

Figur 6: Udsnit af kalibreringstabel for et type K-termoelement. Tabellens tal er i mV, og 0 °C er brugt som referencetemperatur.

I mange måleopstillinger er referencetemperaturen blot en omgivelsestemperatur, der kan variere som følge af mange parametre. **Error! Reference source not found.** viser en termoelementopstilling med separat måling af referencetemperaturen.

Heldigvis findes der en metode til at korrigere for referencetemperaturen og stadig anvende standardkalibreringerne. Integralet i Ligning 5 kan omskrives til *Ligning 6*

$$E_{rj} = \int_0^{T_j} \sigma_{PN} dT - \int_0^{T_r} \sigma_{PN} dT = E_{0j} - E_{0r}.$$

Heraf kan det ses, at den målte spænding over termoelementet er lig med forskellen mellem spændingen over et termoelement med temperaturforskul fra 0 °C

til T_j og spændingen over et termoelement med temperaturforskul fra 0 °C til den aktuelle referencetemperatur, T_r .

Ligning 7

$$E_{0j} = E_{rj} + E_{0r}.$$

Ved hjælp af forholdet i Ligning 7 kan man beregne den tilsvarende spænding, hvis referencetemperaturen havde været 0 °C, og denne spænding kan bruges med standardkalibreringen.

Spændingen E_{rj} er den målte værdi, og E_{0r} kan bestemmes ved hjælp af den målte referencetemperatur, T_r , og kalibreringsdataene.

Boks 6: Eksempel – Temperaturbestemmelse med tabelopslag

Der er foretaget målinger med et type K-termoelement i en opstilling svarende til den vist i Figur 7. Voltmeteret har registreret en spænding på 3,90 mV, og referencetemperaturen er målt til 21 °C.

Bestem den målte temperatur ved hjælp af kalibreringstabellen i Figur 6.

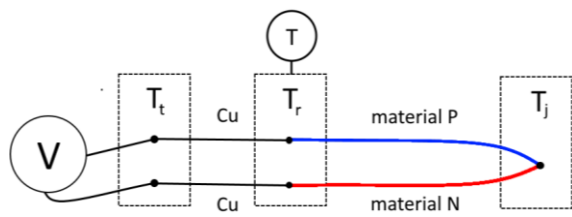
Bidraget fra referencetemperaturen E_{0r} aflæses direkte fra tabellen til $E_{0r} = 0,838$ mV.

Spændingen ved referencetemperaturen 0 °C bestemmes som $E_{0j} = E_{rj} + E_{0r} = 3,90$ mV + 0,838 mV = 4,738 mV

De nærmeste værdier findes i tabellen til 4,714 mV ved 115 °C og 4,755 mV ved 116 °C.

Et mere nøjagtigt resultat bestemmes ved lineær interpolation mellem tabelværdierne. I nedenstående formel refererer notationer H og L til henholdsvis de højere og lavere tabelværdier.

$$T = T_L + \frac{E - E_L}{E_H - E_L} (T_H - T_L) = 115 \text{ °C} + \frac{4,738 \text{ mV} - 4,714 \text{ mV}}{4,755 \text{ mV} - 4,714 \text{ mV}} (116 - 115) \text{ °C} = 115,59 \text{ °C}$$



Figur 7: Termoelementopstilling med separat måling af referencetemperatur.

Denne metode kaldes for Cold Junction Compensation (CJC), da temperaturen ved referencepunktet typisk er lavere end den temperatur, man ønsker at måle.

CJC-metoden kan udføres manuelt, men i industrielle anvendelser er den typisk integreret i systemet ved hjælp af digitale kredsløb, der indeholder kalibreringsdata og kan udføre beregningerne samt en integreret temperatursensor til bestemmelse af referencetemperaturen. Denne temperatursensor skal typisk ikke måle høje temperaturer, og der vælges ofte en lille termistor-sensor, som kan monteres direkte på det elektroniske print.

Integrerede CJC-kredsløb letter målingerne og kan desuden løbende kompensere for ændringer i referencetemperaturen.

Et eksempel på manuel CJC ses i Boks 6.

4 Praktiske aspekter ved målinger

Temperaturmålinger med termoelementer kan udføres på mange måder, fra simple forsøg med et løst termoelement og et multimeter og udregninger på papir til store komplekse systemer med samtidig måling på mange termoelementer og industrielle kredsløb med integreret CJC, der sender resultaterne direkte til professionelle dataopsamlingssystemer.

Men uanset størrelsen og kompleksiteten af ens måleopstilling giver det god mening af bruge tid på at designe sit eksperiment og tage højde for forskellige fejlkilder.

Der er flere punkter, som skal overvejes, når man planlægger en måling. Her kommer en gennemgang af de vigtigste.

4.1 Måleforhold

Under hvilke forhold ønsker man at bestemme temperaturen?

Er det i en gas, en væske eller et fast materiale? Er mediet, man måler på, elektrisk ledende? Eller måske magnetisk?

Hvilket temperaturspænd forventer man? Vil man måle en statisk temperatur eller noget dynamisk? Hvor hurtigt vil temperaturen i så fald variere, og hvor præcist vil man kende ændringen?

Er måleforholdene korrosive? Hvor længe vil man måle?

Hvor mange målinger vil man foretage? Skal der bruges flere termoelementer?

Alle disse spørgsmål er relevante at stille inden en måling, da de hjælper med at tage stilling til de næste spørgsmål.

4.2 Termoelementtype

Et af de store spørgsmål er, hvilken type termoelement man skal bruge. Termoelementtyperne har fået deres eget kapitel, og dette spørgsmål belyses i afsnit 5.

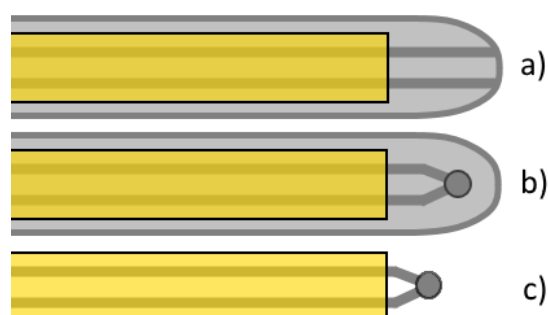
4.3 Installation

Den simpleste installation er blot at holde termoelementet i hånden eller sætte det fast med en klemme. Dette kan virke ved simple, hurtige målinger af f.eks. rumtemperaturer. Men til de fleste anvendelser kræves en mere fast installation både af praktiske hensyn og for bedre at kunne reproducere målinger. Desuden kan det være nødvendigt at beskytte termoelementet, hvis der måles i et hårdt miljø.

For at opnå en lang levetid med pålidelige målinger, anbefales det, at et termoelement ikke benyttes for tæt på dets maksimale temperatur, og at det installeres i det renest mulige miljø.

Industrielle termoelementer kan købes i mange forskellige konfigurationer, hvor de 3 mest udbredte er vist i Figur 8. Billede a) og b) viser termoelementer, der er placeret i en beskyttende kappe. Disse kapper beskytter termoelementet fra mekaniske og kemiske påvirkninger, og materialet af kappen vælges baseret på de forhold, den skal udsættes for. Rummet mellem kappen og termoelementet fyldes ofte med et keramisk pulver.

Forskellen på de to varianter er, at a) er jordet og har termisk og elektrisk forbindelse til kappen. Hvis målemediet ikke er elektrisk ledende, er dette den foretrukne løsning, da forbindelsen mellem kappen og termoelementet giver en kortere reaktionstid ved ændringer i temperaturen. Hvis mediet er elektrisk ledende, kan den elektriske forbindelse være en kilde til støj og unøjagtigheder i målingen, da signalet fra termoelementet som nævnt er meget svagt.



Figur 8: Forskellige konfigurationer af termoelementer. a) Jordet med kappe; b) Isoleret med kappe; c) Fritlagt.

Den tredje variant c) viser et termoelement med fritlagt samling. Den har den korteste reaktionstid men er også den mest udsatte, da den er i direkte kontakt med det omgivende miljø. Denne type leveres ofte i et rør (åben kappe), der afstiver og hjælper installationen.

De forskellige typer kan typisk leveres med standardgevind til selve installationen. Figur 9 viser et industrielt termoelement med kappe og installationsgevind. I nogle situationer kan der også bruges simple gummitætninger til at fastholde røret.

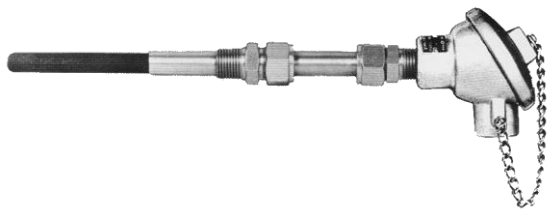
Boks 7: Reaktionstid

Reaktionstiden er defineret som den tid, en sensor skal bruge til at opnå 63,2% af temperaturforskellen i et kontrolleret forsøg med nogle valgte betingelser.

Det måles typisk ved at udsætte sensoren for en pludselig temperaturændring ved at indsætte det i en gas eller væskestrøm, hvor man styrer temperaturen.

Værdien på 63,2% kommer fra den observation, at temperaturændringen af sensoren vokser eksponentielt, og at reaktionstiden beregnes som den inverse værdi af den eksponentielle tidskonstant.

Deraf følger også, at en sensor skal bruge cirka fem tidskonstanter til at komme op på 100 % af temperaturændringen.



Figur 9: Eksempel på et industrielt termoelement med kappe og installationsgevind.

4.4 Kabling

Termoelementer leveres med en begrænset længde på lederne, og der kan være praktiske udfordringer i forhold til længden af kabler i ens måling.

Målingen af referencetemperatur foretages der, hvor man forbinder termoelementet til det elektriske

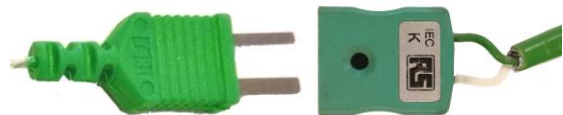
kredsløb. Med begrænset længde på lederne kan det for eksempel være svært at komme langt nok væk fra områder med meget høje temperaturer.

Til dette formål bruger man kompensationskabler, som er kabler med samme Seebeck-koefficienter som termoelementet. De kan enten være lavet af samme legeringer eller af andre materialer med samme Seebeck-koefficient.

Ved brug af kompensationskabler forlænger man i praksis lederne på termoelementet, og derved kan man flytte sin referencesamling. Man skal dog være opmærksom på, at kompensationskabler ofte ikke kan holde til lige så høje temperaturer som selve termoelementet.

Efter referencesamlingen kan der benyttes standardkabler, så længe de er af samme type på positiv- og negativ-siden og enderne holdes ved ens temperaturer.

Termoelementer kan også leveres med standardiserede stik, der indikerer termoelementtypen, og som forhindrer forkert tilslutning af hhv. den positive og negative pol. Et eksempel på disse stik kan ses i Figur 10.



Figur 10: Eksempler på standardstik til et type K-termoelement.

4.5 Referencetemperatur

Måling af referencetemperatur er principielt en separat måling, og der er frit valg af målemetode. Der bruges ofte modstandstermometre, for eksempel en Pt100-føler eller en termistor.

Som nævnt er måling af referencetemperatur indbygget i mange industrielle kredsløb og ofte vises værdien af referencetemperatur slet ikke.

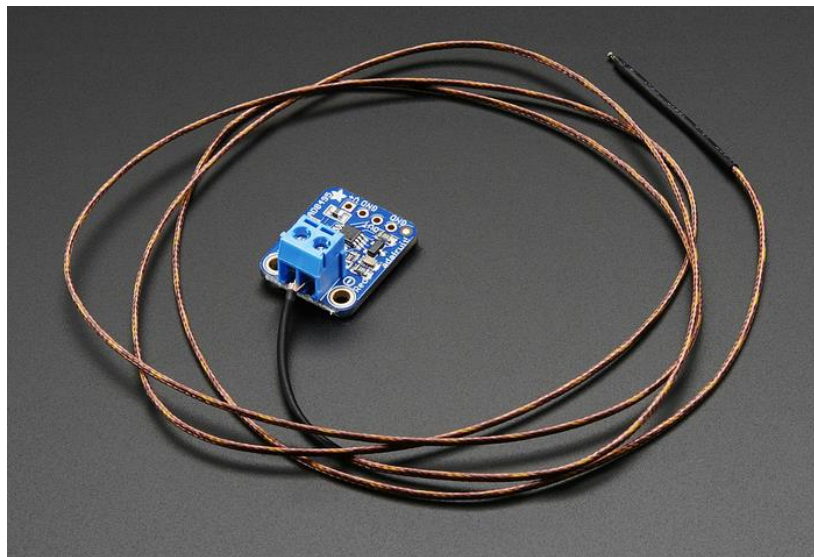
4.6 Spændingsmåling og konvertering

Den simpleste måde at benytte et termoelement er med et multimeter til at måle spændingen. Med information angående referencetemperaturen og kalibreringsdata kan temperaturen bestemmes.

Der findes endda multimeter med CJC og indbygget konvertering af spænding til temperatur via standardkalibreringerne.

Til mere permanente installationer kan der købes integrerede kredsløb med måling af referencetemperatur og indbygget CJC. Der kan også benyttes analog-digital-konvertere, som kan give et digitalt signal, der kan benyttes i dataopsamlingsystemer.

Kredsløbene kan typisk kun anvendes til én eller få typer termoelementer, så valg af type bør gøres tidligt. Mange af disse kredsløb har indbyggede signalforstærkere, så man kan forstærke de svage signaler fra termoelementerne og få en mere nøjagtig måling. **Error! Reference source not found.** viser et integreret kredsløb med signalforstærker og indbygget CJC.



Figur 11: Eksempel på et integreret kredsløb med indbygget CJC og signalforstærker og det tilhørende type K-termoelement.

Billedet er fra [adafruit](#) on [Visual Hunt](#) / [CC BY-NC-SA](#)

5 Typer af termoelementer

Termofølere fås i forskellige normerede standardtyper. Der findes 12-13 forskellige typer definerede i de forskellige standarder, og hver type betegnes med et bogstav.



Figur 12: Et type K-termoelement med standardstik. Stik og isolering farvet efter IEC-standarden.

Standardtyperne blev oprindeligt defineret som kombinationen af de to metaller brugt til at konstruere termoelementet. For eksempel en type K der var sammensat af nikkel-krom og nikkel-aluminium, hvor det førstnævnte materiale er positiv-lederen og det andet er negativ-lederen.

Sidenhen er definitionen af typerne blevet ændret, således at et type K-element blot skal passe på en bestemt kalibrering.

Producenterne er således ikke længere bundet til at bruge faste materialekombinationer til at producere en bestemt type termoelement. I praksis bruges ofte de samme materialer, da det er den nemmeste måde at få elementet til at passe til kalibreringen.

Ofte introduceres forskellige urenheder i form af andre metaller for at rykke termoelementets egenskaber tættere på kalibreringen.

Standardkalibreringer passer til forskellige anvendelsesområder. De tre mest almindelige kalibreringer er K, T og J. Type K er den mest populære på grund af sit store temperaturspænd og lave pris.

Der findes kalibreringer, som er velegnet til høje temperaturer såsom typerne R, S, B og D. Type D er den mest ekstreme og kan anvendes helt op til 2320° C. Højtemperatur-typerne er ofte fremstillet af ædelmetaller for eksempel platin/rhodium og wolfram/rhenium, og er derfor relativt dyre.

Type E er en mere stabil version af type K med højere Seebeck-koefficient og bedre nøjagtighed. Tabel 3 viser en oversigt over Seebeck-koefficienterne for 8 af de mest udbredte typer termoelementer.

Tabel 3: Seebeck-koefficienter af udvalgte termoelementer ved 20 °C.

Seebeck-koefficient ved 20 °C	
Type	σ_{PN} [$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$]
K	40
J	51
N	27
S	7
R	7
B	1
T	40
E	62

Type N er en dyrere version af type K og har bedre modstand over for oxidering. Den øgede stabilitet giver mere konsistente resultater ved lange måleperioder. En oversigt over 8 af de mest udbredte typer termoelementer er givet i Tabel 5.

Termokoblerens kalibrering dikterer temperaturområdet, men maksimumtemperaturen er også begrænset af termokoblerkablets diameter. Et meget tyndt termoelement kan muligvis ikke nå op på det fulde temperaturområde.

De benyttede materialer bestemmer de fysiske egenskaber og modstandsdygtigheden over for termiske, kemiske og mekaniske påvirkninger.

Termoelementerne har et generelt temperaturspænd, men kan benyttes ved mere ekstreme temperaturer i kortere perioder som indikeret i Tabel 5. Benyttes de i længere tid ved ekstreme temperatur øges sandsynligheden for afdrift i målingerne kraftigt.

Som nævnt er der flere standarder for termoelementer, og de adskiller sig fra hinanden på flere punkter. Standarderne definerer blandt andet farvekoder og toleranceklasser for de forskellige typer termoelementer. Farvekoderne er indført for lettere at kunne identificere typen af et termoelement.

De mest udbredte standarder for termoelementer er udgivet af International Electrochemical Commission (IEC 584) og American Society for Testing and Materials (ASTM E230). Begge standarder er internationale, men IEC benyttes mest i Europa og ASTM benyttes mest i USA.

Farvekoderne for IEC er vist i Tabel 5.

Toleranceklasserne er et mål for den nøjagtighed, termoelementet skal leve op til. Tabel 4 viser IEC-toleranceklasserne for type T, hvor klasse 1 er den dyreste. Elementerne kan selvfølgelig bruges uden for de viste temperaturintervaller, men der er ikke specificeret nøjagtigheder uden for intervallerne.

5.1 Valg af type

Når valget af type skal foretages, skal man vende tilbage til overvejelserne fra sidste kapitel og gennemgå følgende punkter igen:

- Temperaturområde









Tabel 4: Toleranceklasser for type T-termoelementer ifølge IEC 584.

Type	Klasse 1 (°C)	
T	$-40 \leq t \leq 125$	$125 \leq t \leq 350$
	$\pm 0,5$	$\pm 0,004 \times t $
Type	Klasse 2 (°C)	
T	$-40 \leq t \leq 133$	$133 \leq t \leq 350$
	± 1	$\pm 0,0075 \times t $
Type	Klasse 3 (°C)	
T	$-67 \leq t \leq 40$	$-200 \leq t \leq -67$
	± 1	$\pm 0,015 \times t $

- Kemikaliebestandighed for termokobleren eller kappematerialet
- Nøjagtighed
- Pris

På baggrund af disse punkter kan man vælge den mest egnede type.

Tabel 5: Typer af termoelementer.

Type	Materialer		Temperaturspænd				IEC-farve	Note
	Positiv	Negativ	Kort tid (°C)		Lang tid (°C)			
K	NiCr	Ni	-180	1300	0	1100		Meget udbredt, allround anvendelse, billigt.
J	Fe	CuNi	-180	800	0	750		Udbredt. Mindre temperaturspænd end K. Kortere levetid ved høje temp.
N	NiCrSi	NiSi	-270	1300	0	1100		Samme nøjagtighed og makstemperatur som K. Mere resistent over for oxidering.
S	PtRh(10%)	Pt	-50	1700	0	1600		God til højtemperaturanvendelse. Dyrt. Bruges ofte inden for biotek og farma.
R	PtRh(13%)	Pt	-50	1750	0	1600		God til højtemperaturanvendelse. Dyrere og mere stabil end Type S.
B	PtRh(30%)	PtRh(6%)	0	1820	200	1700		God til anvendelse i meget høje temperaturer. Svagere signal end S og R.
T	Cu	CuNi	-250	400	-185	300		Meget stabilt. Særligt godt ved meget lave temperaturer.
E	NiCr	CuNi	-40	900	0	800		Mere stabil og nøjagtig end type K og med stærkere signal.

6 Sammenligning med andre målemetoder

Som nævnt i et tidligere kapitel, er de to mest udbredte metoder til temperaturmålinger modstandstermometre og termoelementer.

Her følger en kort sammenligning af de to metoder med fokus på fordele og ulemper.

Temperaturspænd

Termoelementer har klart det største temperaturspænd, og ved temperaturer over 500 °C anvendes primært termoelementer. Nogle specielle termoelementer kan benyttes helt op til 2300 °C.

Reaktionstid

Termoelementer har en meget hurtig reaktionstid og reagerer meget hurtigt ved temperaturændringer.

Hvis man skal måle temperaturer med hurtige ændringer (i størrelsesorden et sekund eller mindre), så giver termoelementer de bedste resultater sammenlignet med modstandstermometre.

Nøjagtighed og stabilitet

Termoelementer er ikke lige så nøjagtige eller stabile som modstandstermometre og termistorer. Fejl på mindre end 1 °C kan være svære at opnå med termoelementer, hvorimod modstandstermometre er mere præcise.

Modstandstermometre er mere stabile og giver konsistente målinger, hvor et termoelement i værste fald kan vise afdrift efter få timer.

Modstandstermometre kræver dog en ekstern strømkilde og er derved følsomme over for fejlvisninger, da sensoren kan blive opvarmet, hvis der tilføres for meget strøm.

Pris

Termoelementer er billigere end de fleste modstandstermometre.

Tilkobling

Modstandstermometre kræver som nævnt ekstern strøm til målinger.

I modsætning til de fleste andre elektriske temperaturmålemetoder, kræver termoelementer ikke ekstern strøm. I nogle situationer kan det være nødvendigt at bruge kompensationskabler til termoelementer, og disse er dyrere end normale kobberledninger.

Holdbarhed

Termoelementer kan konstrueres, så de er mekanisk robuste og med god modstandsdygtighed over for vibrationer. Modstandstermometre er typisk mere følsomme.

7 Fejlkilder

Der er mange potentielle fejlkilder ved målinger med termoelementer. Her gennemgås de mest udbredte.

Forkert tilslutning af termoelementet

Hvis termoelementet eller andre komponenter i kredsløbet er forkert tilsluttede, vil det give en fejl i målingen. Ombytning af polerne på termoelementet vil for eksempel give et forkert fortegn på den målte spænding.

Forkert kabling

Termoelementet eller kompensationskabler bør fortsættes til referencesamlingen for at undgå ekstra spændingsbidrag fra ledninger.

Kortslutning eller løs forbindelse

Kortslutninger og lignende giver en fejl i den målte spænding. Det er dog ikke kun i kredsløbet, men også i selve termoelementet fejl kan opstå f.eks. som følge af kraftig mekanisk påvirkning.

Elektrisk støj

Spændingen genereret af termoelementer er meget lille, og målingen er følsom over for elektrisk støj, som kan give et betydeligt fejlbidrag. Hvis der er meget støj, bør man undersøge, om man kan bruge et jordet termoelement.

Temperaturforskelle ved samlinger

Seebeck-effekten genererer en spænding på alle ledere, som er udsat for en temperaturgradient. I analysen af målekredsløb antages det ofte, at temperaturen ved samlinger holdes konstant, således at bidrag fra ledninger mm. udligner hinanden. Hvis denne antagelse ikke passer, kommer der utilsigtede spændingsbidrag i målingen.

Respons ved dynamiske målinger

Selvom termoelementer har en lavere reaktionstid end mange andre typer temperaturmålinger, vil der stadig forekomme afvigelser mellem den målte og den reelle temperatur ved hurtige ændringer.

Tolerance af termoelementet

Som nævnt tidligere findes der forskellige toleranceklasser for termoelementer. Disse beskriver, hvor store afvigelser termoelementet har i forhold til standardkalibreringen. Fejlen skalerer i nogle anvendelsesområder med temperaturværdien.

Ældning af termoelementet

Det relativt simple forhold mellem temperaturforskellen af samlinger og den genererede spænding er som nævnt kun gyldigt, når begge ledere har ensartede materialeegenskaber (også kaldet homogenitet).

Når termoelementer ældes, kan lederne miste deres homogenitet på grund af kemiske og metallurgiske forandringer, der opstår, når lederne udsættes for høje temperaturer.

Man kan ofte teste termoelementet ved at udsætte det for varmpåvirkning langs lederen mens enderne holdes ved samme temperatur. Hvis der er måles en spænding, er der ikke længere homogenitet i materialet.

Hvis et termoelement har mistet sin homogenitet, kan man foretage en ny kalibrering. Se næste afsnit.

7.1 Ny kalibrering

Når der foretages en ny kalibrering udsætter man termoelementet for kendte temperaturforskelle ved bestemte referencetemperaturer.

På denne måde kortlægger man termoelementets karakteristik og respons under forskellige forhold svarende til den proces, man skal igennem, hvis man laver sit eget termoelement.

Det kalibrerede termoelement kan herefter igen bruges til målinger, men det lever sandsynligvis ikke længere op til hverken standardkalibreringer eller toleranceklasser. Resultatet af kalibreringen skal bruges ved omregning af spænding til temperatur.

8 Lidt termoelektrisk teori

Der er tre forskellige termoelektriske fænomener der kan forekomme i elektrisk ledende materialer: Seebeck-effekten, Thompson-effekten, og Peltier-effekten. Seebeck-effekten kaldes også den termoelektriske effekt og er i fokus her.

Thompson- og Peltier-effekten nævnes kun kort.

I metaller er atomerne arrangeret i en gitterstruktur, og denne pakning af atomerne medfører, at elektronerne i de yderste skaller af atomerne er meget løst bundet til deres atom og nemt kan løsrydes og bevæge sig igennem metallet. Disse kaldes de frie elektroner i materialet.

Termoelektricitet er en konsekvens af, at elektronerne bevægelse påvirkes af både elektriske felter og temperaturgradienter, og Seebeck-effekten er den potentialforskel eller spænding, der opstår, når en elektrisk leder udsættes for en temperaturgradient. Denne spænding skyldes en omfordeling af de frie elektroner i lederen.

Når temperaturen over lederen er konstant, vil der sandsynligvis være en uniform fordeling elektroner i lederen. Men når der påtrykkes en temperaturgradient, vil der ske en omfordeling af de frie elektroner forårsaget af diffusion af elektroner gennem lederen. Denne diffusion resulterer i en fordeling af elektronerne med høj elektrontæthed i den ene ende og lav elektrontæthed i den anden.

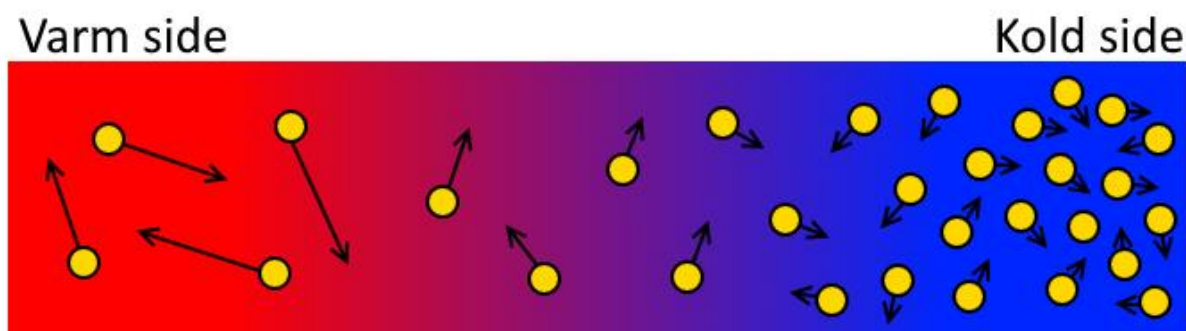
Den tilførte termiske energi bevirker, at elektronerne i krystalgitteret bevæger sig hurtigere. Når de bevæger sig fra den varme til den kolde ende, frigiver de deres bevægelsesenergi og aftager i fart. Elektronerne koncentrerer sig således ved den kolde ende, og der opstår en potentialforskel i forhold til den varme ende. Figur 13 viser en illustration af fænomenet.

Hvis temperaturen er den samme i begge ender af lederen, diffunderer der lige mange elektroner hver vej, og der sker ingen koncentration af elektroner og dermed genereres ingen spænding.

Det skal med rette nævnes, at dette er en simplificeret forklaring, der ikke kan forklare alle aspekter af Seebeck-effekten, som for eksempel materialer med negativ Seebeck-koefficient og materialer, hvor Seebeck-koefficienten skifter fortegn, når temperaturen ændrer sig.

En nærmere forklaring kræver, at man dykker ned i faststoffysikken hvor man blandt andet skal kigge på diffusion af positive ladninger som følge af bevægelsen af 'elektron-huller' samt interaktionen mellem elektroner og fononer (svingninger i atomgitteret). Den endelige Seebeck-effekt bestemmes af styrkeforholdet mellem alle disse fænomener. Det opfordres selv at søge mere information, hvis man er interesseret.

Ved temperaturmåling med termoelementer udnyttes, at ladningsfordelingen er uafhængig af den geometriske udformning ved dimensioner på en mikrometer eller større. Dette gælder dog kun, så længe materialeegenskaberne er ensartede i hele lederen.



Figur 13: Illustration af koncentrationen af elektroner ved en temperaturgradient.

Peltier-effekten

Peltier-effekten omtales somme tider som den omvendte Seebeck-effekt. Det kan være en nyttig måde at huske den på, selvom det ikke er en korrekt beskrivelse. Peltier-effekten beskriver strømmen af varme, der opstår gennem to samlede elektriske ledere, når der påtrykkes en strøm gennem dem. Varmen strømmer gennem lederne mod den ene eller anden samling afhængig af retningen af strømmen.

Thomson-effekten

Thomson-effekten derimod beskriver en lokal varmeudvikling eller optagelse i et materiale udsat for en temperaturgradient, når der sendes en elektrisk strøm gennem det. Hvis strømretningen vendes, vil der skiftes mellem varmeudvikling og -optagelse. Nogle metaller udvikler varme, når strømmen går mod den lave temperatur, andre metaller har varmeabsorption. Varmemængden er proportional med den elektriske strømtæthed og temperaturgradienten.

9 Supplerende info

Herunder følger links og referencer på yderligere materiale samt værktøjer.

Links

NIST ITS-90 Thermocouple Database

(Kalibreringstabeller mm.)

<https://srdata.nist.gov/its90/main/>

Thermocouple Info

(Generel info mm.)

<http://www.thermocoupleinfo.com/>

Thermocouple Table Voltage Calculator

(Online program til bestemmelse af termoelementspænding fra temperatur for standardkalibreringer)

<https://us.flukecal.com/Thermocouple-Table-Voltage-Calculator>

Mineral insulated sheath-thermocouples

(Eksempel på termoelementers reaktionstider, diameter, farvekoder mm.)

<http://www.electronic-sensor.de/en/sheathing-thermocouple-2>

Bøger mm.

Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement, 4th Edition, ASTM Manual Series, ASTM International

Conversion of Thermocouple Voltage to Temperature, Gerald Recktenwald, July 14, 2010

10 Opsummering

I dette kompendium er måling af temperatur ved hjælp af elektrisk termospænding blevet introduceret.

Elektrisk termospænding er et fysisk fænomen, der opstår, når en elektrisk leder udsættes for en temperaturgradient. Dette fænomen kaldes også for Seebeck-effekten.

Seebeck-effektens styrke varierer i forskellige materialer og afhænger af en parameter, der kaldes Seebeck-koefficienten.

Ved at kombinere to ledere af forskellige materialer kan man skabe en sensor, der producerer en spænding, som er afhængig af temperaturforskellen mellem enderne på lederne. Denne type sensor kaldes et termoelement.

Kender man temperaturen i den ene ende, kan man bestemme temperaturen i den anden. Temperaturen i den ende kan bestemmes ved at fastholde til en kendt temperatur, f.eks. med et isbad, eller med en separat temperaturmåling.

Termoelementet findes i en lang række normerede typer, der er bestemt ved standarder.

10.1 Læringsudbytte

Det beskrives, hvordan der kan udføres temperaturmålinger ved hjælp af et termoelement, hvor følerementet består af to elektriske ledere.

Det beskrives yderligere, hvordan målingen udføres i praksis. De mest almindelige fejlkilder ved målingen gennemgås, og beregningen af temperaturen forklares.

Den studerende

- får viden om termoelektricitet og dets anvendelse til temperaturmåling;
- får kendskab til de mest udbredte typer termoelementer;
- får kendskab til fejlkilder ved måling med termoelementer;
- får kendskab til basale kalibreringsprincipper for et termoelement;
- kan vurdere fordele, ulemper og anvendelsesområde for termoelementer.

10.2 Læringsspørgsmål

Gennem brug af dette kompendium vil de studerende kunne besvare følgende spørgsmål:

- Hvad er de fundamentale egenskaber vedrørende elektrisk termospænding?
- Hvordan virker et termoelement i praksis?
- Hvordan bestemmes en absolut temperatur ud fra en spændingsforskel og en referencetemperatur?
- Hvordan korrigeres målinger for ændret referencetemperatur?
- Hvordan benyttes termoelementer til industrielle anvendelser?

10.3 Niveau og omfang

Materialet i dette kompendium kræver kendskab til simple ligninger og til afbildning med grafer, men ikke avanceret matematik. Der vises integraler, men den studerende skal ikke løse dem.

Basal elektricitetslære og fysik er en forudsætning.