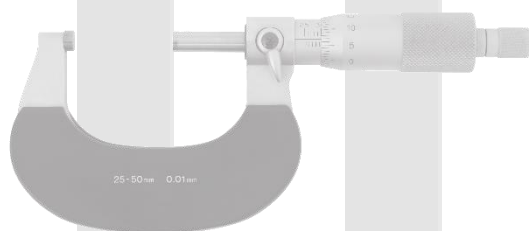


TEMPERATURMÅLING VED HJÆLP AF ELEKTRISK MODSTAND – TEORI

UNDERVISNINGSELEMENT

T1

—
UNDERVISNING
I MÅLETEKNIK

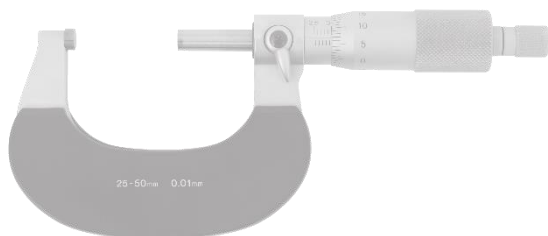


metrologi.dk

TEMPERATURMÅLING VED HJÆLP AF ELEKTRISK MODSTAND – TEORI

Per Thåstrup Jensen, DELTA (revideret af Knud A. Baltzen, FORCE Technology)

2. udgave – September 2017,
redigeret oktober 2019,
redigeret april 2021



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.

Indholdsfortegnelse

1 Indledning	1	Boks 8: Opgave	12
2 Elektrisk modstand	2	4.3 4-terminal-måling	13
2.1 Metaller	2	Boks 9: DC- og AC- spænding og strøm	14
Boks 1: Enheden for konduktans (ledningsevne)	2	5 Kalibrering	15
2.2 Ledningsevne og modstand	2	5.1 Den internationale temperaturskala fra 1990, ITS-90	15
Boks 2: Opgave	3	5.2 Typisk (sekundær) kalibrering	15
2.3 Temperaturafhængighed	3	5.3 Kalibreringsomfang	16
2.4 Approksimation og kurvefitting	4	5.4 Kalibreringscertifikat	16
3 Industrielle temperaturmålere	5	6 Andre måleprincipper	19
Boks 3: IEC og EN	5	6.1 NTC-modstand	19
3.1 Pt100-sensor	5	6.2 Integreret elektronisk sensor	19
Boks 4: Approksimationer for platinmodstand	5	6.3 Termoelement	19
3.2 Beregning af temperatur ud fra modstand	7	6.4 Væskesøjle	19
Boks 5: Beregning af temperatur ud fra modstandsværdi	7	6.5 Mekanisk	19
3.3 Toleranceklasser	8	6.6 Infrarød (pyrometer)	19
3.4 Måleværdiomformer	8	7 Supplerende info	20
Boks 6: HART- og fieldbus	8	7.1 Litteratur	20
4 Måling af modstand	10	7.2 Websites	20
4.1 Strøm og spænding	10	8 Opsummering	21
4.2 Influenstfaktorer	10	8.1 Læringsudbytte	21
Boks 7: Termisk genereret spænding (Seebeck effekt)	11	8.2 Læringssspørgsmål	21
		8.3 Niveau og omfang	21

1 Indledning

I dette kompendium T1 introduceres den studerende til det teoretiske grundlag for en af de metoder, der kan benyttes til en elektrisk baseret måling af temperatur, nemlig modstandstermometret i form af platintermometret.

Emnerne, som gennemgås, er begrebet elektrisk modstand, beskrivelse af industrielle modstandstemperaturmålere, måling af elektrisk modstand, kalibreringsbegreber i relation til modstandstemperaturmåling og omtale af andre metoder til at måle temperatur.

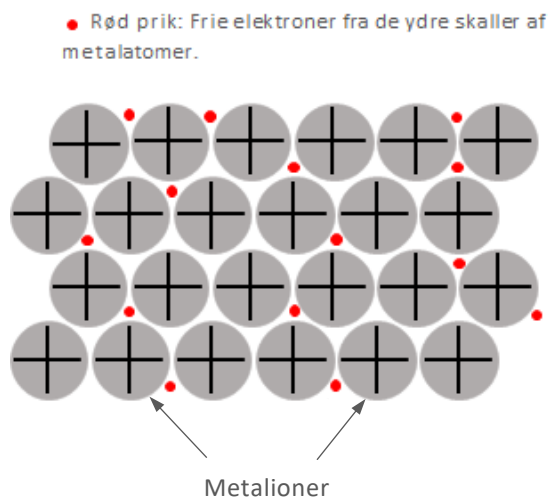
Kompendiet T2 beskæftiger sig med sig med praktiske aspekter af modstandstemperaturmålingen, herunder øvelser med usikkerhedsberegninger og datablade for et industrielt modstandstermometer.

2 Elektrisk modstand

Det er muligt at benytte den fysiske egenskab elektrisk modstand til at udføre en måling af temperatur, da alle metaller har en modstandsværdi, der ændrer sig med temperaturen. Dette forhold udnytter man med modstandstermometret.

2.1 Metaller

Metaller har evne til at lede elektrisk strøm. Elektroner i metallet er så løst tilknyttet til atomstrukturen, at de nemt flytter sig, når der tilsluttes en elektrisk spænding til metallet. Man siger, at elektronerne er frie (de kan bevæge sig frit i metallet).



Figur 1: Frie elektroner som ledningsbærere i metal atomstruktur.

Boks 1: Enheden for konduktans (ledningsevne)

Enheden for konduktans er Siemens (enhedssymbol S), men i litteratur og referencer benyttes også enhedssymbolerne Ω^{-1} , Ohm^{-1} , $1/\text{Ohm}$ eller endda tegnet: $\mathcal{U}$.

Betegnelserne henviser til, at begreberne resistans R (modstand) og konduktans G er hinandens matematiske inverse størrelser. Modstand og ledningsevne anvendes langt oftere end resistans, og vil også anvendes i det følgende. F.eks. svarer modstanden 10Ω til konduktansen $1/10 \text{ S}$.

2.2 Ledningsevne og modstand

Elektronernes bevægelse gennem atomernes gitterstruktur foregår med en række kollisioner med atomgitteret og med andre elektroner. Elektronerne mister derfor en del af deres bevægelsesenergi undervejs. Dette tab af energi betyder, at metallet opvarmes, når det leder strøm.

De elektroner, der udgør strømtransporten i metallet, betegnes også som ledningsbærere. Ledningsbærernes evne til at flytte elektrisk energi med mindst muligt tab har direkte indflydelse på metallets ledningsevne.

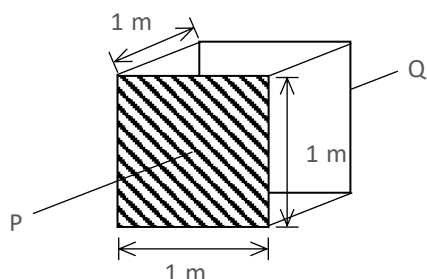
Konduktiviteten betegnes med σ (den specifikke ledningsevne for materialet). σ er det græske bogstav lille sigma. Enheden for konduktivitet er S/m .

Resistiviteten ρ (den specifikke modstand for et materiale) er lig med det inverse af konduktiviteten. ρ er det lille græske bogstav rho. Enheden for resistivitet er $\Omega \text{ m}$ (se også angivet som ohm m eller ohm-meter).

Tabel 1. Konduktivitet og resistivitet af metaller.

Elektriske egenskaber for forskellige metaller ved 20 °C		
Metal/legering	Konduktivitet S/m	Resistivitet $\Omega \text{ m}$
Sølv	$62,9 \cdot 10^6$	$0,0159 \cdot 10^{-6}$
Kobber	$59,5 \cdot 10^6$	$0,0168 \cdot 10^{-6}$
Aluminium	$37,7 \cdot 10^6$	$0,0265 \cdot 10^{-6}$
Wolfram	$17,9 \cdot 10^6$	$0,0560 \cdot 10^{-6}$
Jern	$10,3 \cdot 10^6$	$0,0971 \cdot 10^{-6}$
Platin	$9,43 \cdot 10^6$	$0,106 \cdot 10^{-6}$
Mangan	$2,07 \cdot 10^6$	$0,482 \cdot 10^{-6}$
Konstantan	$2,00 \cdot 10^6$	$0,490 \cdot 10^{-6}$

For en teoretisk klods af metal, som har længden 1 m og arealet 1 m² (se Figur 2), gælder, at størrelsen af modstanden R_{PQ} mellem P og Q er lig med størrelsen af metallens resistivitet. F.eks. fås for kobber (fra Tabel 1), at $R_{PQ} = 0,0168 \cdot 10^{-6} \Omega$.



Figur 2: Teoretisk klods med længde 1 m og areal 1 m².

Hvis man i stedet har en tynd tråd af metallet, f.eks. en firkantet tråd med tværsnitsareal 1 mm x 1 mm, og en trådlængde på 10 m, benytter man Ligning 1 til at beregne modstanden R af netop den dimension tråd. Bemærk, at modstanden gælder kun for den valgte tråddimension, og vil være anderledes for andre tråddimensioner.

Ligning 1

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A},$$

hvor R er modstanden, l er længden af lederen, og A er lederens tværsnitsareal.

I det følgende eksempel benyttes formlen med længden l sat til 10 m og arealet A sat til 0,000001 m² (1 mm x 1 mm).

Værdien for resistiviteten ρ gældende f.eks. for sølv ses fra Tabel 1 at være $\rho_{Ag} = 0,0159 \cdot 10^{-6} \Omega m$.

Modstanden for en sølvtråd beregnes til $R_{Ag} = 0,159 \Omega$ eller 159 m Ω .

Tilsvarende værdi for samme dimension jerntråd beregnes til $R_{Fe} = 0,971 \Omega = 971 \text{ m}\Omega$.

Boks 2: Opgave

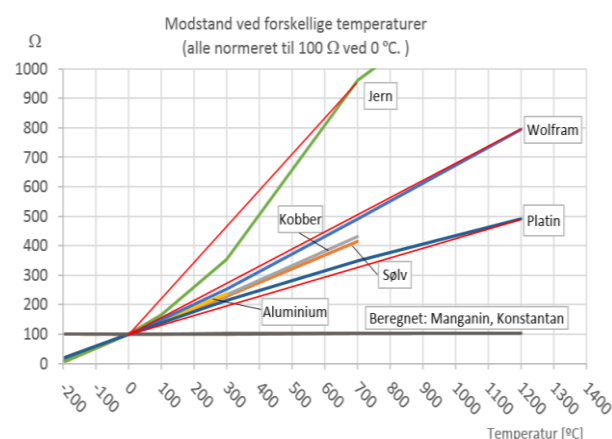
Beregn modstanden af en tråd med længden 10 m og arealet sat til 0,000001 m² (1 mm x 1 mm):

- Platin : _____ m Ω
- Jern : _____ m Ω
- Konstantan : _____ m Ω

Antag at der i stedet benyttes en tråd med dimensionerne 0,14 mm x 0,14 mm. Hvilke modstandsværdier beregnes så for de samme metaller?

2.3 Temperaturafhængighed

Man kan benytte Ligning 1 og værdier fra Tabel 1 til at beregne modstand af de pågældende metaller ved en temperatur på 20 °C. Hvis temperaturen stiger, vil det for de fleste metaller medføre, at resistiviteten stiger i større eller mindre grad. Tilsvarende vil fallende temperatur betyde, at resistiviteten falder. I hvor høj grad resistiviteten forandrer sig afhænger af materialernes temperaturkoefficient. Positiv temperaturkoefficient betyder, at resistiviteten stiger med stigende temperatur.



Figur 3: Modstand af metaller ved forskellige temperaturer (REF = 100 Ω ved 0 °C). De røde linjer er tilnærmede rette linjer.

Tabel 2. Modstand af forskellige metaller som funktion af temperaturen (beregningsmæssigt normeret til 100 Ω ved 0 °C).

Metal / legering	Modstand ved -195 °C	Modstand ved 0 °C	Modstand ved 100 °C	Modstand ved 300 °C	Modstand ved 700 °C	Modstand ved 1200 °C
Sølv	20,4	100,0	141,5	227,2	415,0	-
Kobber	12,9	100,0	143,9	232,3	432,3	(1374)*
Aluminium	8,4	100,0	142,0	236,0	-	-
Wolfram	12,2	100,0	149,0	253,1	489,8	795,9
Jern	7,9	100,0	165,2	353,9	960,7	1371
Platin	20,0	100,0	138,6	214,1	349,6	492,4
Manganin	99,6	100,0	100,2	100,6	101,4	-
Konstantan	99,4	100,0	100,3	100,9	102,1	103,6

NOTE: Værdierne for Manganin og Konstantan er beregnet ud fra en temperaturkoefficient. Der kan findes mange værdier for denne koefficient, da sammensætningen af de to legeringer ikke er præcist beskrevet eller fastlagt.
 *) Værdien ved 1200 °C for kobber gælder reelt for 1083 °C, der er nær smeltepunktet på 1084 °C [1].

Tabel 2 og Figur 3 viser et antal værdier for modstanden af metaller ved forskellige temperaturer. Bemærk, at alle modstandsværdierne er angivet for et stykke leder dimensioneret således, at stykket har modstanden 100 Ω ved 0 °C uanset resistiviteten af metallet. Dette er gjort for bedre at kunne sammenligne temperaturvariationen af de forskellige metaller. Ved de øvrige temperaturer ses det, at modstanden ikke er ens for metallerne. Nogle metaller ændrer modstand markant, mens andre nærmest er upåvirkede af den ændrede temperatur. Konstantan og Manganin er legeringer, der er specielt udviklet til at have en ekstremt lille temperaturafhængighed. Nogle af metallerne har smeltepunkt under 1200 °C, og deres værdier er derfor ikke medtaget i tabellen og grafen.

skal kunne stole på omregningen i et stort temperaturområde, så har man brug for en ligning med bidrag af 2. potens, 3. potens eller endnu højere orden for at få tilstrækkelig stor nøjagtighed af beregningen.

Anvendelse af tilnærmede kurveforløb, kurvefitting eller andre former for approksimation til det rigtige temperaturforløb er gennemgået i større detaljegråd i afsnit 3.1 og afsnit 3.2.

2.4 Approksimation og kurvefitting

Tallene fra Tabel 2 er også afbildet i Figur 3. Sammenlign med de rette linjer (rød farve), der er lagt ind i figuren. Det kan umiddelbart ses, at metallerne udviser ret forskellig temperaturafhængighed, og at deres variation ikke følger en ret linje.

Hvis man ønsker at anvende en ret linje (og dermed en meget simpel beregning af temperaturen ud fra modstandsværdien), så kan dette kun gøres nøjagtigt i ret små temperaturområder af gangen. Hvis man

3 Industrielle temperaturmålere

I mere end 130 år har platin været det foretrukne materiale til fremstilling af modstandstermometre. Platin har den fordel, at det er ekstremt modstandsdygtigt over for korrosion, er relativt let at forme (bl.a. til tynde tråde eller film), kan fremskaffes i høj renhed og udviser stor reproducerbarhed i modstand. Det gør det muligt at fremstille specifikke sensorer der, afhængigt af opbygningen, er i stand til at dække et måleområde på -200 °C til 850 °C med typiske nøjagtigheder på nogle få grader (uden kalibrering). Med den rette kalibrering kan der opnås nøjagtigheder på helt ned til få hundrededele af en grad i et begrænset måleområde.

Betegnelsen termometer (engelsk: thermometer) bruges om den samlede enhed bestående af platin-sensoren og dens mekaniske indkapsling, der beskytter selve sensortråden mod omgivelserne. Andre betegnelser for termometret kan være passiv temperaturføler eller Pt100-føler. Bemærk, at mange termometre er indkapslet sammen med en måleværdiomform, der omtales nærmere i afsnit 3.4.

For at sikre ensartethed i specifikationer og dermed mulighed for direkte at kunne udskifte én (eksempelvis defekt) sensor med en anden, er der lavet en specifik international standard IEC/EN 60751, som beskriver de væsentligste parametre for industrielle platinmodstandstermometre og -sensorer.

I IEC/EN 60751 skelnes imellem selve "sensoren", dvs. den målende del, og et komplet "modstandstermometer", der ud over sensoren også inkluderer et passende hylster, interne forbindelser og eksterne måleterminaler. IEC/EN 60751 beskæftiger sig ikke med måleværdiomformere (omtales i afsnit 3.4).

Boks 3: IEC og EN

IEC betegner den internationale organisation International Electrotechnical Committee. Når IEC udgiver en standard, udgives den ofte samtidig (og med stort set samme tekst) som en European Norm (EN). IEC 60751 og EN 60751 er derfor næsten ens dokumenter.

3.1 Pt100-sensor

IEC/EN 60751 angiver to måleområder, med hver deres tilhørende sammenhæng mellem modstand og temperatur. Modstandsværdien kan beregnes (approximeres) som funktion af temperaturen:

Boks 4: Approksimationer for platinmodstand

I temperaturområdet fra -200 °C til 0 °C kan platinresistansen tilnærmes ved hjælp af en tredjegrads ligning:

$$R(t) = R_0 \cdot (1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot (t - 100 \text{ °C}) \cdot t^3)$$

I temperaturområdet fra 0 °C til 850 °C behøver man kun bruge en andengrads ligning:

$$R(t) = R_0 \cdot (1 + A \cdot t + B \cdot t^2),$$

hvor koefficienterne A, B og C har værdierne:

$$A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ °C}^{-1}$$

$$B = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ °C}^{-2}$$

$$C = -4,183 \cdot 10^{-12} \text{ °C}^{-3}$$

Værdien R_0 kaldes den "nominelle værdi" og er modstanden ved 0 °C. I IEC/EN 60751 er den nominelle værdi defineret som 100 Ω og derfor taler vi ofte om en "Pt100 sensor".

Der tillades også multipla af denne værdi, hvor 500 Ω og 1000 Ω (dvs. Pt500 og Pt1000) er de mest almindelige.

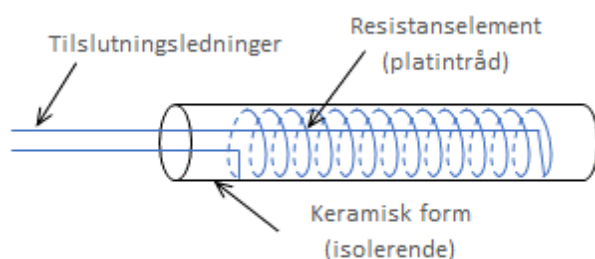
Fordelen ved Pt500 og Pt1000 er større følsomhed, dvs. større ændring i modstand med temperaturen (Pt100: ca. 0,4 Ω/°C; Pt500 ca. 2,0 Ω/°C; Pt1000 ca. 4,0 Ω/°C).

Der findes også sensorer med lavere nominelle værdier, eksempelvis 25 Ω, 10 Ω, 5 Ω og 0,25 Ω. Generelt anvendes de lavere nominelle værdier i specielle præcisionstermometre, hvor der kræves meget lav måleusikkerhed. Et eksempel er i de såkaldte SPRT'er

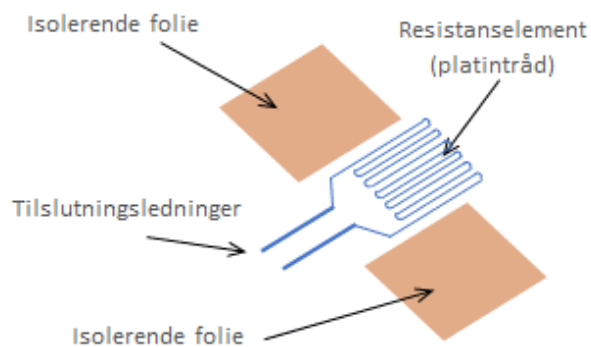
(Standard Platinum Resistance Thermometer) der bl.a. anvendes i forbindelse med den Internationale temperaturskala (ITS 90), der omtales i afsnit 5.1. Disse termometre er dog normalt ikke egnet til industriel brug pga. en skrøbelige konstruktion og lav følsomhed.

Platinsensorer kan grundlæggende deles op i to kategorier: trådviklede og tyndfilm (chip).

Trådviklede sensorer:



Figur 4: Eksempler på trådviklet platinsensor RTD (Resistance Temperature Detector).



Figur 5: Eksempel på trådviklet sensor med folieindkapsling.

De trådviklede sensorer kan igen opdeles i tre hovedtyper:

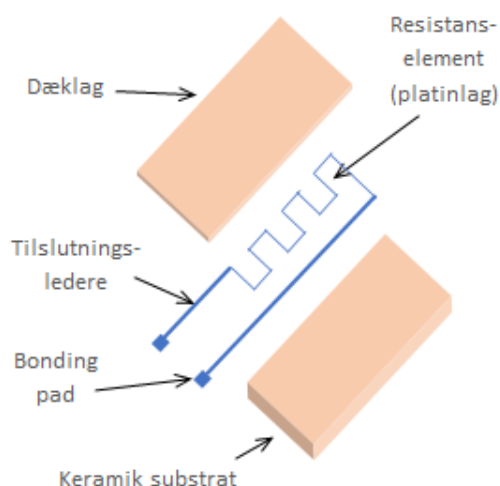
- Platin-glas, hvor én eller to vindinger er spundet (fast) omkring en glasstang og derefter lukket inde med et glashylster (med så-

kaldt "fusing" af glasset). Denne konstruktion er hermetisk tæt og anvendes typisk i området -200 til 400 °C.

- Platin-keramik, hvor to eller fire spoler af tråden ligger (relativt løst) inde i forborede huller i keramikken, der efterfølgende er fyldt op med eksempelvis aluminiumoxidpulver. Disse sensorer kan dække et måleområde på helt op til -200 til 800 °C.
- Foliesensorer, hvor en tynd vinding er støbt inde imellem to polymerfolier (typisk polyimid). Disse sensorer har typisk kort responstid og kan med fordel anvendes på overflader. Måleområdet er typisk -80 til 180 °C.

Tyndfilmsensorer

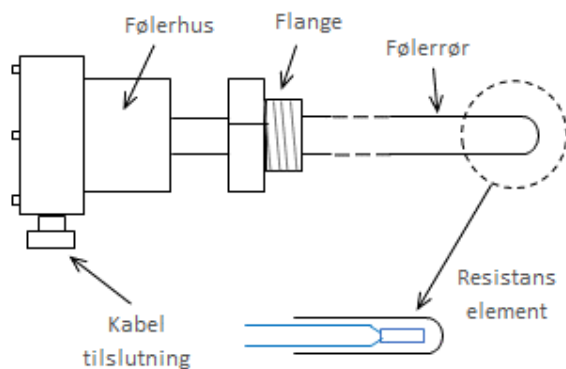
Tyndfilmsensorer (eller chipsensorer) produceres ved, at platinet pådampes et tyndt stykke keramik (substrat). Platincoatingen formes til et serpentinformat mønster i en fotolitografisk proces. Keramikken forsynes desuden med elektriske forbindelser og beskyttende glaslag. Chipsensorer findes også som en SMD-komponent eller monteret/indstøbt i små sensorrør (keramik, polymer mm.). Tyndfilmsensorer kan dække et måleområde på ca. -70 °C til 600 °C, afhængigt af typen. De er normalt billigere end trådviklede sensorer, har kort responstid og kan laves ekstremt robuste. Trådviklede sensorer har dog normalt bedre langtidsstabilitet end chipsensorer.



Figur 6: Principopbygning af tyndfilmsensor (chipsensor).

Modstandstermometer IEC/EN 60751

Som tidligere nævnt skelner IEC/EN 60751 imellem sensor og modstandstermometer. Et eksempel på et komplet industrielt modstandstermometer er vist i Figur 7.



Figur 7: Komplet modstandstermometer.

Modstandstermometret indeholder, ud over sensoren, de dele, der gør det praktisk anvendeligt. Et hylster beskytter sensoren mod slag, vibrationer, forurening, elektrisk støj, mm. og sørger desuden for tilstrækkelig god varmeoverførsel til sensoren. Forbindelseshovedet gør det muligt at lave en robust elektrisk forbindelse til ekstern måleelektronik.

Ud over det rent måletekniske indeholder IEC/EN 60751 en lang række miljøtest af både den enkelte sensor og det komplette modstandstermometer.

3.2 Beregning af temperatur ud fra modstand

For at kunne beregne temperaturen ud fra modstanden af en Pt100-sensor er man nødt til at isolere temperaturen t i de to formler fra afsnit 3.1. For andenordenspolynomiet der dækker området 0 °C til 850 °C , fås nedenstående formel.

Boks 5: Beregning af temperatur ud fra modstandsværdi

I temperaturområdet fra 0 °C til 850 °C kan temperaturen t beregnes ud fra følermodstanden R :

$$t = \frac{-R_0 \cdot A + \sqrt{(R_0 \cdot A)^2 - 4 \cdot R_0 \cdot B \cdot (R_0 - R)}}{2 \cdot R_0 \cdot B},$$

hvor koefficienterne A og B har de tidligere omtalte værdier fra Boks 4:

$$A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ °C}^{-1}$$

$$B = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ °C}^{-2}$$

For tredjeordenspolynomiet, der dækker området -200 °C til 0 °C , kræves et større regnearbejde, som ligger udenfor omfanget af dette kompendium.

I stedet kan man anvende et færdigt beregningsværktøj der ligger frit tilgængeligt på Internettet:

<http://www.isotech.co.uk/prt-calculator>

3.3 Toleranceklasser

IEC/EN 60751 definerer to toleranceklasser for platin-modstandstermometre:

Class A: $\pm (0,15 + 0,002 t)$,

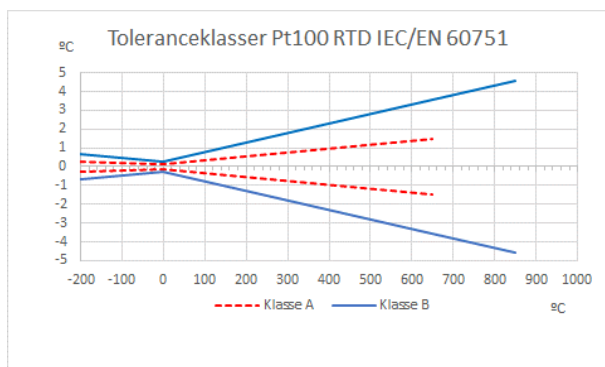
Class B: $\pm (0,3 + 0,005 t)$,

hvor t er den absolutte værdi af temperaturen i °C.

Class A gælder for det begrænsede temperaturområde -200 til 650 °C.

Class B gælder for hele det temperaturområde, der dækkes af IEC/EN 60751, dvs. -200 til 850 °C.

Det bemærkes, at ovenstående toleranceklasser både indeholder bidrag fra nulpunktstolerancen (0 °C) og den temperaturafhængige tillægstolerance (hældningen).



Figur 8: Toleranceklasser.

Til sidst skal det nævnes, at man stadigvæk kan måle meget mere nøjagtigt med en sensor (uanset toleranceklasse), hvis man får den passende kalibreret og korrigerer for dens målefejl, f.eks. ved hjælp af en kalibreringskurve (se afsnit 5).

3.4 Måleværdiomformer

Præcisionsmåling af modstand i termometret udføres som regel af en elektronisk enhed, der ofte er bygget ind i termometrets kabinet. Enheden kaldes en måleværdiomformer, da den omdanner modstand til et analogt signal (en strøm, spænding eller frekvens), der er proportionalt med temperaturen. Nogle måleværdiomformere kan også omdanne målesignalet til

et digitalt signal som for eksempel HART- eller fieldbus kommunikation.

Boks 6: HART- og fieldbus

Specielle typer 2-tråds digital kommunikation, der anvendes i processtyringssystemer.

Denne serielle, digitale kommunikation kan kommunikere direkte med et processtyringsanlæg. Da måleværdiomformeren sender temperatursignalet videre til processtyringsanlægget, benævnes den ofte også "transmitter" eller "temperaturtransmitter".

Analog måleværdi

Næsten alle moderne måleværdiomformere indeholder et mikroprocessorkredsløb, der dels styrer den elektriske måling af platinsensorens modstand, og dels korrigerer denne med hensyn til linearitet, approksimation eller kalibreringsdata. Det er derfor muligt at opnå en præcisionsmåling af modstand samtidig med en præcisionsomregning fra modstand til temperatur.

De analoge sensorer omsætter yderligere den beregnede temperatur til et analogt målesignal, der for eksempel anvender en strøm i området 4 til 20 mA. Strømmen kan indstilles til for eksempel at være 4 mA svarende til 0 °C og 20 mA svarende til 100 °C (eller 500 °C). Mellem de to yderværdier varierer strømmen lineært. Tilsvarende kan udgangssignalet være en spænding på 0 V til 10 V, der varierer på samme vis. Tilpasningen af temperaturskala mv. vælges ofte ved hjælp af små knapper (DIP-switches) på omformeren.

4-20 mA strømudgangene er specielt nemme at anvende, da selve måleværdiomformeren bruger så lidt strøm, at den kan strømforsynes via 2-tråds forbindelsen. Omformeren bruger i sig selv kun ca. 2 mA, og den styrer så "resten" af strømforbruget ved at styre en strømgenerator, der leverer den analoge udgangsstrøm. På den måde behøver måleværdiomformeren ikke en speciel strømforsyning. Den tilsluttes blot til for eksempel 24 VDC og til processystemets strømindgang, og den sørger så for at styre strømmen igennem

sig, så strømværdien er lig med den måleværdi, som omformeren er indstillet eller programmeret til.

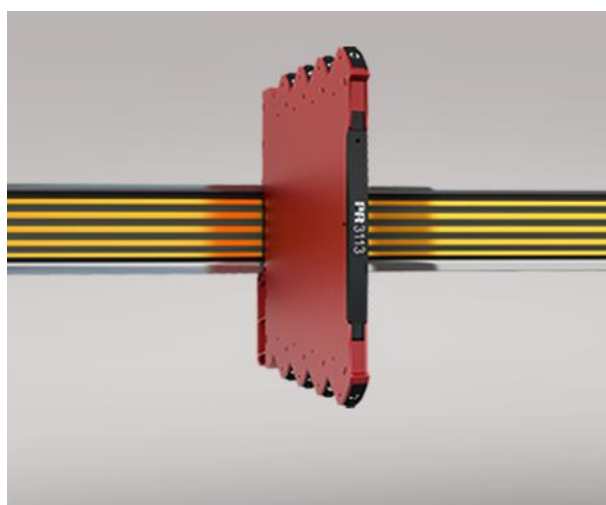
Digital måleværdi

Kommunikationen mellem digitale transmittere og processtyringsanlægget kan udgøres af en seriel kommunikation. Visse omformere kan sende data som "1" og "0" via 4-20 mA signalering. Dette betegnes ofte som "strømsløjefekommunikation", og anses for at være mere robust end for eksempel seriel kommunikation af typen RS 232 og RS 485.

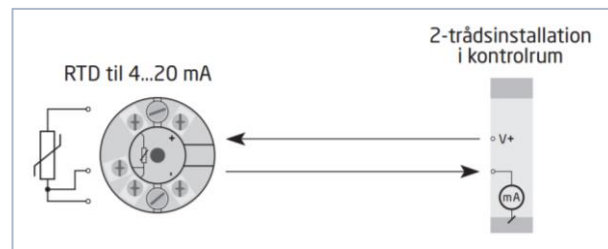
Eksempler på måleværdiomformere og tilslutninger til sådanne kan findes i Figur 9-13.



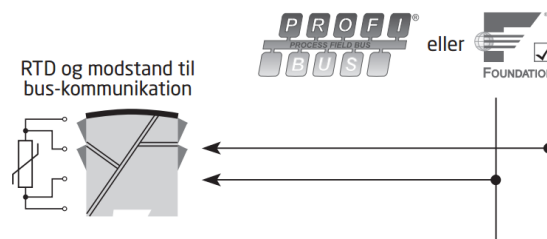
Figur 9: Eksempel på måleværdiomformer til indbygning i termometer (PR electronics).



Figur 10: Eksempel på måleværdiomformer til indbygning i styretavle (PR electronics).



Figur 11: Eksempel på tilslutningsprincip for 2-tråds omformer med 4-20 mA tilslutning (PR electronics).



Figur 12: Eksempel på tilslutningsprincip for 2-tråds omformer med ProfiBus tilslutning (PR electronics).



Figur 13: Eksempel på indkapslet tyndfilm Pt100 temperatursensor med plads til indbygning af rund måleværdiomformer (PR electronics)

4 Måling af modstand

Når man benytter en modstandsværdi til at fastlægge en temperatur, så er det afgørende, at man er i stand til at måle modstandsværdien rimelig nøjagtigt. Hvordan det kan gøres fremgår af de næste kapitler.

4.1 Strøm og spænding

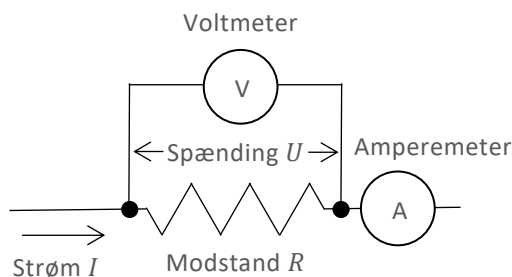
Elektrisk modstand har betegnelsen R . Af Ohms lov (Ligning 2) fremgår det, at den spænding, U , man måler over et modstandselement er proportional med den strøm, I , man sender igennem det. Modstanden er proportionalitetskonstanten R .

Ligning 2

$$U = R \cdot I$$

Enhederne passer hvis spændingen måles i volt (V), strømstyrken i ampere (A) og modstanden i ohm (Ω).

Det er derfor ret simpelt at måle en modstandsværdi. Det er blot at sende en kendt strøm igennem modstanden og så måle, hvilken spænding der optræder henover modstandselementet. Et principdiagram for målingen er vist i Figur 14.

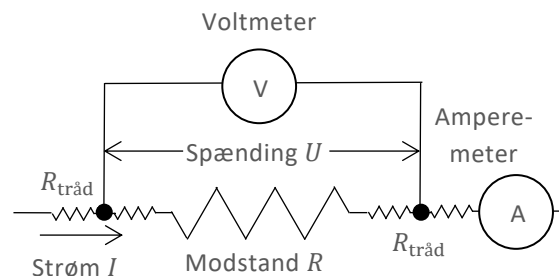


Figur 14: Strøm-spændingsmåling på modstanden R .

I dette kompendium har vi arbejdet med modstandsværdier, der ligger i størrelsesordenen omkring 100 Ω . Værdierne for en Pt100-sensor kan ligge i intervallet fra ca. 20 til omkring 1000 Ω afhængigt af temperaturen. Hvis man teoretisk set forestiller sig, at vi ønsker at sende 1 A igennem sensorelementet, så kan vi forvente at måle en spænding på mellem 20 V og 1000 V med voltmeteret.

Vi ved fra beskrivelsen af de industrielle termometre, at sensordelen er lavet i en meget tynd tråd, og at det

også er ret tynde ledninger, der fører fra tilslutningspunkterne og ned til selve sensorelementet. Disse ledninger har også en modstandsværdi, og denne modstand er tegnet ind på Figur 15.



Figur 15: Diagram af modstandsmåling med trådmodstand indtegnet.

Modstanden er tegnet som flere forskellige individuelle bidrag, da den er fordelt over hele længden af den kobbertråd, der løber mellem sensorelementet og tilslutningsklemmen.

Det fremgår af Figur 15, at det ikke er uvæsentligt, hvor voltmeteret tilsluttes. Den spænding, der optræder over andelen $R_{\text{tråd}}$, vil betyde, at modstanden R overvurderes ved målingen.

4.2 Influensfaktorer

Trådmodstanden er en af de faktorer, der kan påvirke en korrekt måling af modstandsværdien i sensorelementet og derved muliggøre en nøjagtig temperaturmåling.

Andre vigtige influensfaktorer kan være:

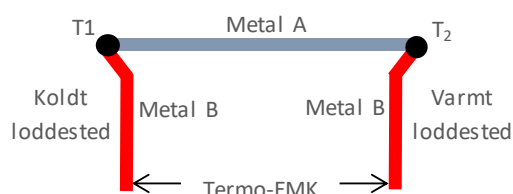
- Målestrømmen I afsætter effekt i sensorelementets tråd, der derved opvarmes;
- Voltmetrets strømforbrug (en lille del af strømmen I løber igennem voltmeteret);
- Sensorelementets tråd har ikke termisk god kontakt til det sted, hvor temperaturen skal måles. Termisk modstand eller termisk tidskonstant kan betyde, at målested og sensortråd ikke har samme temperatur (er i termisk ligevægt);

- Der kan optræde termisk genererede spændinger i samlingerne mellem to forskellige metaller (skrue, ledninger mv.). Sådanne spændinger betegnes ofte termospændinger eller termo-EMK.

Endelig kan nøjagtigheden af approksimationsberegningen eller tilnærmelsen af den rette linje, der benyttes til beregning af temperaturen, være utilstrækkelig til den aktuelle måleopgave.

Boks 7: Termisk genereret spænding (Seebeck effekt)

Termoelektrisk effekt eller Seebeck-effekten optræder, når to forskellige metaller berører hinanden og danner et kredsløb. De to berøringspunkter (betegnes ofte "loddested" eller på engelsk "junction") skal have hver sin temperatur, før der optræder en termogenereret spænding. Termospændingen kaldes undertiden også termo-EMK, hvor EMK er ElektroMotorisk Kraft.



I det følgende beregnes virkningen af første nævnte influensfaktor, nemlig opvarmning fra målestrømmen.

Hvis vi vender tilbage til det eksempel, at der sendes en strøm på 1 A igennem sensoren, så vil der afsættes følgende effekt i sensortråden:

Ligning 3

$$P = U \cdot I,$$

hvor P er den afsatte effekt, U er spændingen, og I er strømmen i modstanden. Når spænding og strømstyrke indsættes i hhv. volt og ampere fremkommer effekten med enheden watt (W).

Da $U = R \cdot I$, kan dette omskrives til

Ligning 4

$$P = R \cdot I^2,$$

hvor P er den afsatte effekt, R er modstanden, og I er strømmen gennem modstanden.

Med 100 Ω modstand og 1 A ses det, at den afsatte effekt bliver 100 W. Dette vil medføre en øjeblikkelig voldsom overophedning af den tynde sensortråd og vil straks brænde sensoren af.

Hvis man regner med, at der indgår ca. 5 cm platintråd i selve sensoren, og denne skal ramme værdien 100 Ω ved 20 $^{\circ}\text{C}$, så kan Ligning 1 benyttes til at udregne tykkelsen af platintråden. En rund tråd kan beregnes til en diameter på 8,2 μm . En tråd med firkantet tværsnit kan beregnes til en sidelængde på 7,3 μm .

Volumen V for 5 cm tråd kan udregnes til at udgøre 0,0265 mm^3 .

Massen m af 0,0265 mm^3 platin beregnes ved hjælp af massefylden ρ (Rho), der er oplyst til ca. 21000 kg/m^3 (= 21 g/mm^3) som

Ligning 5

$$m = V \cdot \rho$$

Massen beregnes til 56 mg.

Denne masse af platin opvarmes af de afsatte 100 W. Hvor hurtigt, den opvarmning sker, afhænger af varmekapaciteten af platin, der er 130 $\text{J}/(\text{kg } ^{\circ}\text{C})$ (130 $\text{mJ}/(\text{g } ^{\circ}\text{C})$). For at opvarme de 56 mg platin 1 $^{\circ}\text{C}$ kræves en tilført energimængde E på 130 $\text{mJ}/\text{g} \cdot 0,056 \text{ g} = 7,28 \text{ mJ}$.

Hvis man vil beregne den tid, det tager for de 56 mg platin at opvarmes 1 $^{\circ}\text{C}$, så kan dette beregnes ud fra den nødvendige energimængde på 7,28 mJ som

Ligning 6

$$E = P \cdot t,$$

hvor E er den tilførte energi, P er den afsatte effekt, og t er opvarmningstiden for 1 grads temperaturstigning. Indsættes $P = 100 \text{ W}$ samt $E = 7,28 \text{ mJ}$, så fås $t = 0,0728 \text{ ms}$ (millisekund). For hvert millisekund vil platintråden teoretisk set opvarmes 13,7 $^{\circ}\text{C}$, indtil metallet smelter ved ca. 1770 $^{\circ}\text{C}$. Det tager dermed kun ca. 129 millisekunder (0,129 s) at opvarme platinmængden til smeltepunktet.

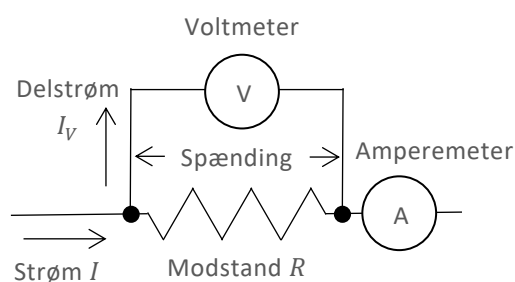
Hvis målestrømmen gennem sensortråden i stedet reduceres til for eksempel 1 mA, så kan tilsvarende opvarmningsdata beregnes til:

- Stadig 7,28 mJ for at øge temperaturen 1 grad
- Der afsættes nu kun 100 μ W i sensortråden
- Opvarmningstiden for en temperaturstigning på 1 grad bliver dermed ca. 73 sekunder.

Den netop udførte beregning af temperaturstigningen er meget teoretisk, og tager ikke højde for, at sensortråden kan være monteret på et stykke keramik og være monteret inden i et rustfrit stålør. Disse dele vil også skulle opvarmes, og opvarmningen vil derfor tage længere tid, da delene bidrager med en varmekapacitet, der er adskillige gange større end selve sensortråden.

Opvarmningen vil dermed afhænge af den konkrete opbygning af sensoren. Det kan dog konkluderes, at selv så beskeden en målestrøm som 1 mA ikke vil være acceptabel, hvis den er tilsluttet konstant. Strømmen er nødt til at være endnu mindre, eller den kan kun tilsluttes kortvarigt, således at der kun kan nå at optræde en acceptabel opvarmning. Industrielle måleværdiometer anvender en målestrøm, der for eksempel kan være 150 μ A.

Den anden af de nævnte influensfaktorer er voltmetrets strømforbrug, delstrømmen I_V .



Figur 16: Strømmene I_V gennem voltmetret og I gennem modstanden R .

Hvis det antages, at modstanden R er 100 Ω og voltmetrets indre modstand kobles parallelt med denne modstand, ses det at spændingen, som måles med

voltmetret, optræder samtidig over både voltmetret selv og modstanden R .

Impedansen (den indre modstand) for et digitalt voltmeter kan være i størrelsesordenen 1-10 M Ω . Da 1 M Ω er 10000 gange større end 100 Ω , vil der kun gå $\frac{1}{10000}$ eller 0,01% af målestrømmen I gennem voltmetret. Dette er formodentlig så lille en indflydelse, at det er ubetydeligt for måling af modstanden R . Bemærk dog, at analoge viserinstrumenter af drejespøletypen vil kunne have en indre modstand på nogle få k Ω når de er indstillet til at måle 100 mV.

Boks 8: Opgave

Se Figur 16. Spændingen U over en temperatursensor på 100 Ω er 100 mV. Beregn delstrømmen I_V for et analogt voltmeter, hvor den indre modstand er 2 k Ω .

Hvor stor en procentdel udgør delstrømmen I_V af strømmen I på 1 mA?

Procentdel : _____ %

Vurdér og drøft, om denne procentdel er acceptabel i relation til den ønskede målenøjagtighed.

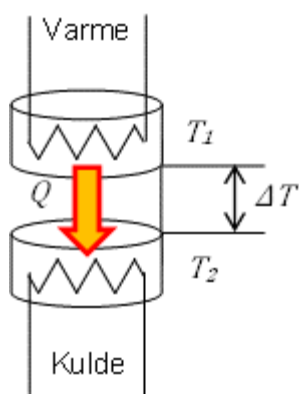
Den tredje af de nævnte influensfaktorer er sværere at fastsætte en værdi for end de øvrige. Den komplette temperatursensor består af dels sensortråden og dels den elektriske isolering, der forhindrer at tråden har elektrisk forbindelse til følerørret. Følerørret er som oftest udført i syrefast rustfrit stål, hvilket gør den meget robust og egnet til at blive placeret i væsker eller aggressive miljøer. Følerørret er dog også en ulempe, da rustfrit stål ikke er specielt godt varmeledende. Kappen er dermed kun i rimelig god termisk kontakt til sensorelementet indeni.

Det samme forhold gør sig gældende for isoleringsmaterialet, der adskiller sensortråden fra følerørret.

Der er især risiko for dårlig termisk kontakt mellem målepunktet og sensortråden, hvis der er meget stor forskel i temperatur på målepunktet og omgivelsestemperaturen, eller hvis der er tale om måling i for eksempel stillestående luft. Hvis temperaturen af målemediet pludselig ændrer sig, kan det tage sekunder,

før ændringen når frem til platintråden inden i sensoren. Hvis ændringen sker i stillestående luft, kan tidskonstanten være flere minutter.

En sammenligning af varmeledningsevnen illustrerer problemstillingen. Hvis varmeledningen sker gennem et stykke materiale (testemnet) placeret mellem de to cylindre som vist i Figur 17, så kan varmeledningsevnen defineres som energiflowet Q/A delt med varmegradiënten $\Delta T/\Delta L$ mellem de to cylindre.



Figur 17: Definition af opstilling for måling af varmeledningsevne.

Varmeledningsevnen beregnes ved hjælp af Ligning 7 og har enheden $W/(m \cdot ^\circ C)$:

Ligning 7

$$K = \frac{Q/A}{\Delta T/\Delta L} = \frac{Q \cdot \Delta L}{A \cdot \Delta T},$$

hvor K er varmeledningsevnen, Q er effekten transmitteret gennem testemnet, A er kontaktfladens areal, ΔT er temperaturforskellen mellem testemnets to sider, og ΔL er testemnets tykkelse.

Tabel viser sammenligning af data for forskellige materials varmeledningsevne. Det ses, at metallerne er klart bedst til at lede varme. Diamant er dog en endnu bedre varmeleder. De elektrisk isolerende materialer kan være gode varmeledere, men silikonepasta (der ofte benyttes til elektrisk isolering i temperatursensorer) er, som det ses, en rimelig dårlig varmeleder. Derfor vil man ved anvendelser bruge tynde lag af silikonepasta.

Tabel 3. Termiske egenskaber for materialer.

Termiske egenskaber af forskellige materialer	
Materiale	$W/(m \cdot ^\circ C)$
Silikonepasta	0,7-1,3
Rustfrit stål	Ca. 16
Platin	70-75
"Keramik"	Fra <50 til >200
Aluminium	Ca. 200
Kobber	Ca. 400
Diamant	1000 eller mere

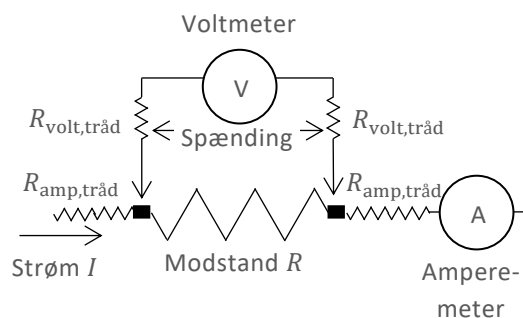
Populært udtrykt kan man sige, at da varmen (eller kulden) fra målepunktet oftest er nødt til at passere en elektrisk isolerende barriere bestående af enten keramik eller silikonepasta, så er det denne barriere, der bliver afgørende for, hvor nemt varmeenergi kan passere mellem sensortråd og det medie, der måles på. Mekanismen er afgørende for, hvor hurtigt temperaturlige vægten vil indstille sig. Konkrete værdier af tidskonstanten for temperatursensorer kan findes ved at slå op i fabrikanternes datablade.

4.3 4-terminal-måling

I Figur 15 er det vist, hvordan ledningsmodstand kan have indflydelse på en nøjagtig måling af sensorelementets modstand (R på diagrammet Figur 15). Denne måling er meget afgørende, da fejl i målingen vil føre til en tilsvarende fejl i temperaturangivelsen. For at minimere indflydelsen fra målestrømmen anvendes en speciel kobling, der tillader, at målestrøm og målt spænding adskilles bedst muligt. Koblingen kaldes en 4-terminal-måling, og princippet er vist i Figur 19.

Som det fremgår af diagrammet, er spændings- og strømledere tilsluttet således, at ledningen til spændingsmåling ikke bliver gennemløbet af målestrømmen. Der anvendes normalt samme trådtykkelse i alle de fire ledere, der fører til voltmeter og strømkreds. På grund af opkoblingsmåden bliver det dog ukritisk, hvor stort spændingsfald der sker over modstandene

$R_{\text{amp,tråd}}$. Spændingslederne fører kun til voltmetret, og dets strømforbrug på grund af indre modstand kan normalt forventes at være forsvindende lille. Hvis målingerne skal være meget præcise, vil man kunne beregne den strøm, der flyder gennem voltmetret, og kompensere for den.



Figur 19: Principdiagram af 4-terminal-modstandsmåling med sensormodstand R og trådmodstande indtegnet.

Boks 9: DC- og AC- spænding og strøm

DC er den engelske betegnelse for jævnstrøm/jævnspænding. DC står for "Direct Current".

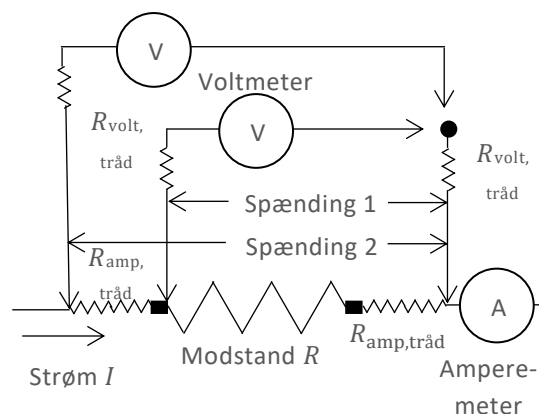
AC er den engelske betegnelse for vekselstrøm/vekselspænding. AC står for "Alternating Current".

Selv om den engelsk betegnelse nævner ordet strøm (current), så bruges betegnelsen både om spænding og strøm.

I nogle tilfælde benytter man en simplere kobling med kun tre ledere (3-terminal måling). Princippet er vist i Figur 18. Der er indtegnet to voltmetre til måling af henholdsvis spænding 1 (kun spænding over modstanden R samt en andel af $R_{\text{amp,tråd}}$), og spænding 2 (spænding hen over modstanden R samt begge dele af $R_{\text{amp,tråd}}$).

Hvis de tre tråde til sensormodstanden R er helt ens, kan modstanden af R beregnes ret nøjagtigt.

Den fjerde og sidste influensfaktor der omtales her er tilstedeværelsen af termospændinger (termo-EMK) genereret i ledninger med kontakt til sensortråden. I kredsløb, hvor der optræder store temperaturforskelle mellem målepunkt og instrumentering, kan de temperaturskabte spændinger betyde afvigelser på målte strømme eller spændinger. Spændingerne har



Figur 18: Principdiagram af 3-terminal-modstandsmåling med sensormodstand R og trådmodstande indtegnet.

størst betydning, hvis der udføres måling af platinsensorens modstand ved hjælp af jævnspænding (DC-spænding).

Der findes også målekredsløb, der måler platinsensorens modstand ved hjælp af et AC måleprincip. I så fald tilføres en vekselstrøm til sensoren, og vekselspændingen måles. For at princippet kan fungere, skal frekvensen være rimelig lav, så ledningsinduktanser og magnetisk kobling (spolevirkning eller induktion) ikke får for stor betydning. Det er også vigtigt, at målefrekvensen ikke ligger tæt på 50 Hz eller overtoner til 50 Hz (100 Hz, 150 Hz, 200 Hz, ...), da magnetfelter fra elforsyningen i så fald kan forstyrre målingen. Måleprincipper baseret på vekselspændinger kan være meget nøjagtige, da bidrag fra instrumentstøj, drift og termo-EMK kan undertrykkes bedre end ved DC-målinger.

Influensfaktorer udover de allerede beskrevne dækkes ikke af dette kompendium. Der henvises til specialiseret fagmateriale for de videregående uddannelser (universiteter).

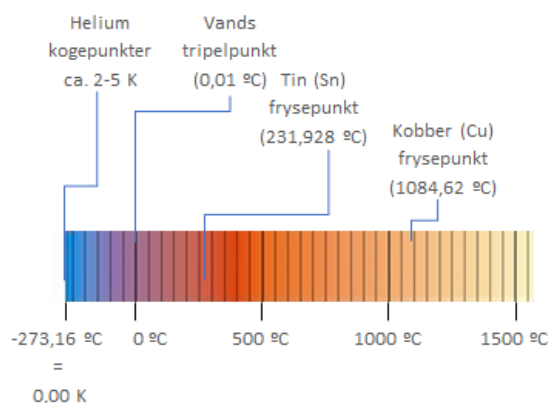
5 Kalibrering

Kalibrering af et industrielt modstandstermometer, f.eks. af Pt100-typen (se afsnit 3), foregår i langt de fleste tilfælde som en såkaldt "sekundær" kalibrering. Det vil i praksis sige ved sammenligning med et andet referencetermometer der er kalibreret med højere nøjagtighed/lavere måleusikkerhed og med sporbarhed til SI-enheden for temperatur, kelvin (K), via den internationale temperaturskala ITS-90.

Forskellen mellem det kalibrerede termometer og referencetermometret (dvs. målefejlen), samt måleusikkerheden for kalibreringen, skrives ind i et kalibreringscertifikat. Certifikatet kan herefter bruges til at vurdere om termometrets målefejl ligger indenfor det acceptable. Resultaterne kan også anvendes til at korrigere termometrets visning, så målefejlen fjernes. I det følgende introduceres den internationale temperaturskala og kalibreringsprocessen gennemgås.

5.1 Den internationale temperaturskala fra 1990, ITS-90

Sporbarhed til SI-enheden for temperatur, kelvin (K), går i praksis via den internationale temperaturskala ITS-90.



Figur 20 – Den Internationale temperatur skala fra 1990, ITS-90

I ITS-90 er temperaturområdet -259 °C til 962 °C bestemt som en kombination af:

- Bestemte referencepunkter i form af nøje udmålte smelte-, fryse- eller kogepunkter for en række stoffer. Disse punkter kaldes "fikspunkter";
- Bestemte termometertyper (Standard Platinum Resistance Thermometer, SPRT), der anvendes til måling imellem fikspunkterne;
- En række formler, der behøves for at termometrene skal kunne måle rigtigt imellem fikspunkterne.

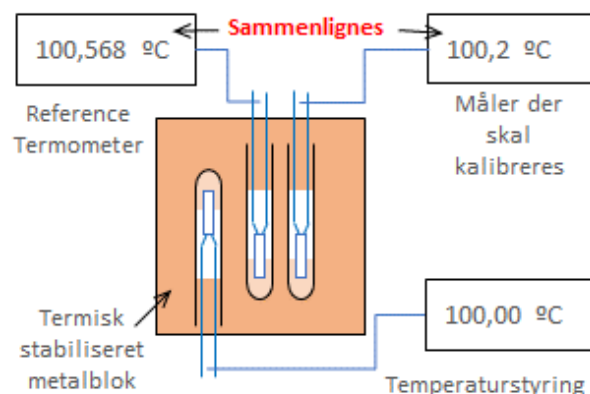
Det mest præcise punkt på ITS-90 skalaen er vandets såkaldte tripelpunkt (hvor vand/is/damp eksisterer stabilt på samme tid). Det kan realiseres med en usikkerhed omkring 0,1 - 0,2 m°C og er en god reference for, "hvor godt man kan måle temperatur i praksis".

En "primær" kalibrering af et termometer kræver, at man har instrumenteringen beskrevet i ITS-90 og kan derfor normalt kun udføres i nationale metrologiinstitutioner.

5.2 Typisk (sekundær) kalibrering

En (sekundær) kalibrering af et industrielt modstandstermometer ved sammenligning med et referencetermometer foregår normalt ved at begge termometre placeres ved en bestemt temperatur kaldet kalibreringstemperaturen.

For at opnå en så ensartet temperatur som muligt anvendes enten et væskebad eller en såkaldt "tørblok-kalibrator", der basalt set er en metalblok med hulrum til følerne. Princippet er vist i Figur 21.



Figur 21: Kalibrering ved sammenligning i "tørblok".

I Figur 21 er vist en typisk kalibrering af et modstands-termometer med elektronik/display ("Måler der skal kalibreres") med et "Referencetermometer". Kalibreringen er her udført ved den nominelle temperatur 100 °C, der holdes konstant af en "Temperaturstyring" med et tredje termometer. I nogle tilfælde bruges referencetermometret direkte i styringen, så det ekstra termometer undgås.

Målefejlen kan bestemmes som: $100,2\text{ °C} - 100,568\text{ °C} = -0,4\text{ °C}$. Det kalibrerede termometer viser altså 0,4 °C for lavt ved 100 °C.

5.3 Kalibreringsomfang

Omfanget af en kalibrering bestemmes ofte som et nødvendigt kompromis imellem en række tekniske krav og økonomi. Der findes derfor ikke konkrete retningslinjer for, hvordan man udfører en kalibrering af et termometer "helt korrekt". I det følgende er i stedet givet en række tommelfingerregler for god praksis ved bestemmelse af kalibreringsomfanget for termometre.

- Det mindste antal kalibreringspunkter er normalt 3. Dette er også minimum for at kunne bestemme koefficienterne i andengradspolynomiet (over 0 °C) beskrevet i afsnit 3.2.
- Flere kalibreringspunkter er altid bedre, da de kan bruges til at fastlægge fejl-/kalibreringskurven endnu bedre (eksempelvis ved regression).
- Selvom termometret kun skal bruges ved én bestemt temperatur, anbefales det at kalibrere det i yderligere to punkter, ét over og ét under denne temperatur.
- Kalibreringspunkter bør enten være specifikke for det temperaturområde, termometret skal anvendes i, eller dække omkring 80 % af termometrets specificerede måleområde. Det er bedst at undgå top og bund af måleområdet, da termometret kan have dårligere måleevne her.
- De valgte kalibreringspunkter bør fordeles med samme indbyrdes afstand i måleområdet (eksempelvis: 0, 50 og 100 °C for måleområdet 0-100 °C).

- Kravet til kalibreringens måleusikkerhed bør være i samme størrelsesorden som specifikationerne for termometret, der kalibreres. Da det kalibrerede termometer indgår i det samlede usikkerhedsbudget, gælder det generelt, at jo dårligere termometer der kalibreres, des dårligere bliver den måleusikkerhed, som opgives i certifikatet.
- Kalibreringsintervallet (perioden mellem to kalibreringer) bør først og fremmest bestemmes ud fra termometrets brug og konsekvenserne af en evt. fejlmåling. Mange virksomheder har ét eller flere generelle krav til kalibreringsintervaller for bestemte kategorier af instrumenter. Disse ligger typisk fra 3 måneder til 2 år.

5.4 Kalibreringscertifikat

Ud over en række formelle oplysninger som bl.a. kalibreringsudstyr, sporbarhed, kalibreringsdato, rekvi-rent mm. indeholder kalibreringscertifikatet en liste, der viser termometrets målefejl i de aftalte kalibreringspunkter. Et eksempel er vist nedenfor.

Temperatur		Visning °C	
°C	A	B	
0.000	-0.005 ± 0.003	-0.005 ± 0.003	
-50.001	-49.995 ± 0.010	-49.994 ± 0.010	
-25.003	-25.025 ± 0.010	-25.025 ± 0.010	
25.001	25.002 ± 0.010	24.999 ± 0.010	
50.002	50.001 ± 0.010	49.998 ± 0.010	
75.000	75.003 ± 0.010	75.005 ± 0.010	
100.000	100.000 ± 0.011	99.998 ± 0.011	
0.000	-0.005 ± 0.003	-0.005 ± 0.005	

Figur 22: Eksempel på kalibreringsresultater med visning i °C.

Eksemplet viser kalibreringsresultaterne for et 2-kanales "præcisionstermometer" bestående af målelektronik, display for visning i både °C og Ω samt to Pt100 modstandstermometre (A og B).

Kalibreringsmåleområdet er -50 til 100 °C, og der er kalibreret i 7 punkter. Bemærk, at punktet 0 °C er gentaget til sidst i målerækken. Dette er for at tjekke termometrenes repeterbarhed. Hos nogle kalibreringslaboratorier er dette standard, men ikke hos alle, og man bør derfor tjekke/aftale dette, når kalibreringen bestilles.

Tager man eksempelvis første kolonne/række fra certifikatet, er værdien under "Temperatur" laboratoriets referenceværdi ved punktet 0 °C. Derudover ses, i kolonne 2, måleværdien for føler A, som her er -0,005 ± 0,003 °C. Føler A viser derfor 0,005 °C for lavt (dvs. målefejlen ved 0 °C er -0,005 °C) med en usikkerhed på ± 0,003 °C. Et andet sted i certifikatet er det angivet, at måleusikkerheden er opgivet med en dækningsfaktor $k = 2$, svarende til 95 % konfidensinterval i en normalfordeling. Dette er standard og er forklaret nærmere i kompendiet *T2 Temperaturmåling ved hjælp af elektrisk modstand - praktik/øvelsesdel*, afsnit 3.2.

I eksemplet ovenfor ses også den meget typiske kalibreringsrækkefølge fra laveste mod højeste temperatur.

Kalibrering er i dette eksempel bestilt med resultater i både °C og Ω. I Figur 23 ses resultaterne for Ω-visningen.

Temperatur		Visning Ω	
°C	A	B	
0.000	99.978 ± 0.001	99.932 ± 0.001	
-50.001	80.268 ± 0.004	80.256 ± 0.004	
-25.003	90.161 ± 0.004	90.132 ± 0.004	
25.001	109.715 ± 0.004	109.650 ± 0.004	
50.002	119.374 ± 0.004	119.292 ± 0.004	
75.000	128.961 ± 0.004	128.864 ± 0.004	
100.000	138.472 ± 0.004	138.357 ± 0.004	
0.000	99.978 ± 0.001	99.932 ± 0.001	

Figur 23: Eksempel på kalibreringsresultater med visning i Ω.

Som nævnt tidligere i dette afsnit vil man normalt vurdere, om målefejlen ligger inden for det acceptable. I ovenstående eksempel ville de fleste nok konkludere, at målefejlen er så lille, nemlig sammenlignelig med måleusikkerheden, så yderligere korrektion ikke kan betale sig. Ville man alligevel gøre dette, eksempelvis for føler A i området 0 til 100 °C, kunne man bruge resultaterne ved 0, 50 og 100 °C til at finde konstanterne: R_0 , A og B i IEC/EN 60751 andengradspolynomiet (se afsnit 3.2).

R_0 kan aflæses direkte af certifikatet til 99,978 Ω. I stedet for at udføre beregningerne af A og B her er beregningsværktøjet fra Internettet (afsnit 3.2) anvendt.

Ved følgende indtastning i beregningsværktøjet:

T1	T2
50.002	100.000
R1	R2
119.374	138.472

og

SELECTED RESISTANCE	SELECTED RESISTANCE VALUE
Ro	99.978

fås:

COEFFICIENTS	
A	B
0.00390955	-5.93e-7

Dermed har man fundet kalibreringskurven for føler A i området 0 til 100 °C og kan beregne temperaturen for andre aflæste modstandsværdier i dette måleområde uden fejlvisning (måleusikkerheden kan man dog ikke korrigere for).

6 Andre måleprincipper

6.1 NTC-modstand

En NTC-modstand er en keramisk modstand, hvor keramikken udviser en temperaturafhængighed. Ved højere temperatur falder modstanden – deraf navnet NTC (Negative Temperature Coefficient). NTC-modstande har begrænset målenøjagtighed, men er meget billige.

6.2 Integreret elektronisk sensor

Denne betegnelse dækker over en lang række integrerede sensorer, der er opbygget på en siliciumchip. Sensorerne kan indeholde en modstandssensor og en komplet målekæde samt analog eller digital måleværdiomformer. Sensorerne har et begrænset temperaturområde, men er meget fleksible at anvende og kan have stor nøjagtighed.

6.3 Termoelement

Termoelementer er baseret på en temperaturafhængig spændingsforskel mellem to forskellige metaller. Ved at måle elektrisk spændingsforskel mellem et "varmt" og et "koldt" loddested (de punkter, hvor metallerne har kontakt med hinanden) kan temperaturen fastlægges meget nøjagtigt. Sådanne målinger er baseret på, at metallerne udviser termoelektrisk effekt (også betegnet Seebeck-effekten).

6.4 Væskesøjle

Væskesøjletermometre kendes bedst fra sprit- eller kviksilverbaserede termometre, hvor en tynd streng af væsken kan udvide sig frit i et lufttomt glasrør. Udvidelseskoefficienten betyder, at væsken vil skubbe sig opad når temperaturen stiger. Væskehøjden i det tynde glasrør kan mærkes op, så den viser temperaturen på en skala.

6.5 Mekanisk

Mekaniske termometre fungerer ligesom væskesøjletermometre ved hjælp af mekanisk udvidelse af materialer ved højere temperatur. Mest anvendt er bimetal-termometre, hvor to strimler af forskellige metaller er klæbet sammen og formet til en spiral, der er tilkoblet en mekanisk viser og en skala. Når temperaturen stiger, udvider materialerne sig forskelligt, og spiralen vil øge eller mindske sin krumning, så viseren flytter sig på skalaen.

6.6 Infrarød (pyrometer)

Temperatur kan måles berøringsfrit med infrarøde termometre. Disse måler temperaturen ved hjælp af varmeudstrålingen fra målepunktet. Dette er muligt fra et stykke under vands tripelpunkt og op til meget høje temperaturer. Sensoren er en halvledersensor, der kan minde om en billedsensor fra et digitalkamera, men sensoren er gjort specielt følsom over for IR (InfraRød) spektralområdet. Ved nøjagtige målinger anvendes et afkølet sensorelement, ofte med flydende nitrogen.

Ved meget høje temperaturer anvender man optisk spektralanalyse af den varmestråling, der udsendes fra målestedet. Populært kan man sige, at hvidglødende er varmere end rødglødende, og et strålingspyrometer kan måle temperaturer i området over metallers smeltepunkt.

7 Supplerende info

I dette afsnit findes data, der supplerer kompendiets tekst. Yderligere data kan findes på:

7.1 Litteratur

- [1] Kaye & Laby, "Tables of physical and chemical constants" 14th Edition, Longman Group, 1973, pp. 102-106.
- [2] BIPM, JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections), Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement

7.2 Websites

<http://www.its-90.com/index.html>

<http://www.isotech.co.uk/prt-calculator>

<http://www.preelectronics.dk/products/temperature>

[https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/All-Web/A707D00EE0F558D6C12574E1002C2D1C/\\$file/tniec751_ce.pdf](https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/All-Web/A707D00EE0F558D6C12574E1002C2D1C/$file/tniec751_ce.pdf)

8 Opsummering

I dette kompendium introduceres den studerende til en af de metoder, der kan benyttes til en elektrisk baseret måling af temperatur, nemlig modstandstermometret i form af platintermometret.

8.1 Læringsudbytte

Det beskrives, hvordan der kan udføres temperaturmålinger ved hjælp af en platintemperaturføler, hvor et stykke platintråd udgør følerelementet, samt hvordan modstandsmålingen udføres i praksis. De mest almindelige fejlkilder ved målingen gennemgås, og beregningen af temperaturen forklares.

Den studerende

- får viden om sammenhængen mellem elektrisk modstand og temperatur for metaller som for eksempel platin;
- får kendskab til Pt25, Pt100, Pt500, Pt1000 platintermometre og disses egenskaber;
- får kendskab til fejlkilder ved modstandsmåling, herunder 4-terminal-modstandsmåling;
- får kendskab til basale kalibreringsprincipper for et modstandstermometer samt information om Den Internationale Temperaturskala;
- kan vurdere fordele, ulemper og anvendelsesområde for platintråds termometre;
- får kendskab til andre mulige transducere for temperaturmåling (termoelement, mekaniske, væskesøjle, pyrometer - IR).

8.2 Læringsspørgsmål

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

- Hvad er de konstaterede fundamentale egenskaber vedrørende elektrisk modstand af metaller?
- Hvordan påvirkes målefunktionen af den målestrøm, der benyttes?

- Hvordan påvirkes målefunktionen af størrelsen af det, der måles på?
- Hvordan påvirkes målefunktionen af massen af det, der måles på?
- Hvordan påvirkes målefunktionen af varmekapaciteten af det, der måles på?
- Hvordan kalibreres et modstandstermometer?

8.3 Niveau og omfang

Materialet i dette kompendium kræver kendskab til simple ligninger og til afbildning med grafer, men ikke avanceret matematik.

Basal elektricitetslære som forståelse af Ohms lov og beregning af elektrisk effekt er en forudsætning. Basal fysik som forståelse af begrebet varmekapacitet er en forudsætning.