

16 Temperatuurmeting

De temperatuur T (of θ) met als eenheid de Kelvin [K] is evenals de lengte en de massa één van de basisgrootheden van de stof. De Kelvin [K] is de thermodynamische temperatuur die gelijk is aan het 1/273,16 gedeelte van de thermodynamische temperatuur van het tripelpunt van water. In de praktijk wordt de temperatuur vaak weergegeven in graden Celsius [°C]. Soms is de temperatuur in Fahrenheit gegeven:

$$T_C = 5/9 \cdot (T_F - 32)$$

De temperatuur kan op verschillende manieren gemeten worden.

16.1 Kwikthermometer, Alcoholthermometer

Kwik heeft een regelmatige uitzetting en is bruikbaar van -40 tot 300 °C, en tot 750 °C indien de ruimte boven het kwik gevuld is met stikstof onder druk (30 bar).

Naast kwik worden ook andere vloeistoffen als thermometervulling gebruikt, bijvoorbeeld: alcohol (-100 °C tot 70 °C), toluen (-80 °C tot +100 °C) of pentaan (-180 °C tot 25 °C).

Door de relatief grote afmetingen en de traagheid is dit meetsysteem wel voor temperatuurmetingen maar niet voor automatisering geschikt.

16.2 Bimetaalthermometer

Bij een bimetaalthermometer zijn twee verschillende metalen tot een strip of band op elkaar gewalst. De twee metalen hebben een verschillende thermische uitzetting. Zo ontstaat een vervorming (kromtrekken) die een maat is voor de temperatuur.

De bimetaalthermometer wordt toegepast voor het meten van de temperatuur in ovens en als Aan/Uit thermostaat voor het regelen van de temperatuur in lokalen, ovens, koelkasten, diepvriezers enz.

Tengevolge van de relatief grote massa zijn ze vrij traag. Toch worden ze zeer veel toegepast.

Het verschil tussen in- en uitschakeltemperatuur (i.e. de differentieel) is ongeveer 2 Kelvin. Om de differentieel te verkleinen, zodat de lokaaltemperatuur minder schommelt, is meestal een zogenaamde 'anticipatiweerstand' R in de lokaalthermostaat ingebouwd. Bij het sluiten van het contact in gevolge de temperatuurdaling in het lokaal, vloeit er ook een kleine stroom door de anticipatiweerstand R . Door de warmteontwikkeling in R samen met de warmte van de opwarmende radiatoren, zal het contact eerder openen dan zonder deze weerstand R .

16.3 Vloeistofdruk- en dampdrukthermometers

Bij een *vloeistofdrukthermometer* is een metalen reservoir, voorzien van een Bourdon-buis, volledig gevuld met vloeistof (kwik, ether, petroleum). Bij temperatuurstijging zet de vloeistof meer uit dan het metaal, waardoor drukverhoging optreedt. Deze drukverhoging, die een maat is voor de temperatuur, kan gebruikt worden om temperaturen te meten (thermometer) of om temperatuurgevoelige regelingen te maken.

Bij de *dampdrukthermometer* is het een manometer die de verzadigde dampspanning van de vloeistof in het meetelement aanwijst. Gebruikte vloeistoffen zijn: zwaveldioxide, methaan, ether of kwik. De schaal is niet lineair, maar bij kleine temperatuurvariaties zijn grote drukvariaties mogelijk, waardoor het een gevoelig meetinstrument is.

Deze thermometers worden o.a. toegepast in thermostatische kranen of thermische regelafsluiters:

- ♦ *Thermostatische kranen*: Indien de temperatuur in het lokaal stijgt, verhoogt de druk van het temperatuurgevoelig element. Hierdoor zal de thermostatische kraan meer sluiten waardoor minder warm water naar de radiator stroomt.
- ♦ *Thermische regelafsluiters*: Het temperatuurgevoelig element wordt in dit geval meer of minder verwarmd d.m.v. een ingebouwde verwarmingsweerstand (van bijv. 22Ω of 15 Watt). Indien er geen stroom door het ingebouwd verwarmingselement vloeit, is de regelafsluiter in principe dicht. Daalt de temperatuur in het lokaal dan dient men er voor te zorgen dat iets meer vermogen en dus iets meer warmte ontwikkeld wordt in de verwarmingsweerstand waardoor de regelafsluiter verder opent.

16.4 Weerstandstemperatuurmeting (met metaalweerstand)

De weerstandstemperatuurmeting is gebaseerd op de relatie tussen weerstandswaarde en temperatuur van een meetweerstand:

$$R(T) = R_0(1 + \alpha T + \beta T^2 + \dots)$$

Hierin zijn T de temperatuur in °C of K, R_0 de weerstand bij 0 °C, $R(T)$ de weerstand bij T °C en α , β , ... de temperatuurcoëfficiënten eigen aan het materiaal.

We onderscheiden *metaalweerstand*, welke een relatief kleine positieve temperatuurcoëfficiënt α (PTC) bezitten, en *halfgeleiderweerstand*, waaronder NTC- en PTC-weerstand. Deze laatste worden behandeld in paragraaf 16.5.

Tabel 3.2 geeft een aantal karakteristieken van (gebruikte) metaalweerstand. In de Engelstalige literatuur spreekt men meestal van "Resistance Temperature Detector" of kortweg van RTD.

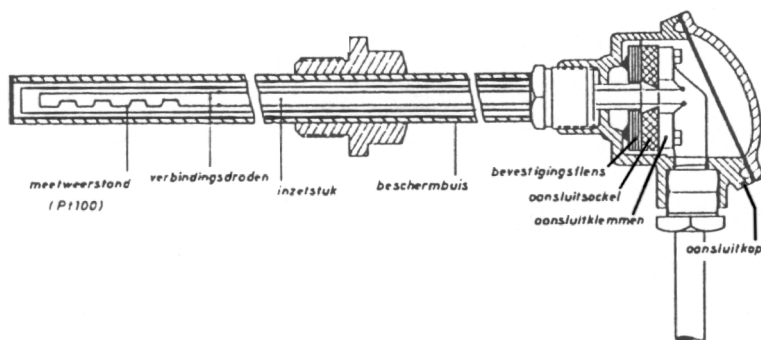
Materiaal	Temp.gebied °C	Temp.coëff. α Ω/°C
Platina	-200 tot 850	0,39
Nikkel	-80 tot 320	0,67
Koper	-200 tot 260	0,38

Tabel 3.2: Karakteristieken van enkele metaalweerstand.

Platina wordt het meest gebruikt als temperatuurgevoelige metaalweerstand. De Pt100 is een temperatuuropnemer uit platina waarvan de weerstand 100 Ω bedraagt bij 0 °C. De voornaamste eigenschappen van deze opnemer zijn:

- ♦ De Pt100-opnemer kan worden gebruikt over een tamelijk groot temperatuurgebied (-200 tot 850 °C).
- ♦ De Pt100 heeft een zeer goede stabiliteit over een lange periode (deze is veel beter dan bij het thermokoppel Chromel-Alumel).
- ♦ De weerstandsverandering per graad Celsius is ongeveer 0,38 Ω/°C ; deze waarde is evenwel niet volledig constant over het ganse temperatuurgebied.
- ♦ Meestal bevindt het weerstandselement zich in een buis (zakbuis of Eng.: thermowell) die mechanische en chemische bescherming biedt. Hierdoor is eveneens vervanging van de temperatuuropnemer zonder dat het proces wordt gestoord, mogelijk. Tabel 3.3 geeft een overzicht van mogelijke beschermende materialen.
- ♦ De Pt100-opnemer gedraagt zich als een eerste orde systeem. De tijdconstante τ is 0,1 tot 1 sec, afhankelijk van de afmetingen (van enkele mm tot 0,5 m). τ kan echter 5 tot 10 maal groter worden t.g.v. de beschermhuis.
- ♦ Benaderend geldt $R(T) = 100 + 0,390802 \cdot T - 5,802 \cdot 10^{-5} \cdot T^2$
- ♦ In mindere mate komen ook Pt50, Pt200, Pt500 en Pt1000-opnemers voor; zij hebben overeenkomstige weerstandswaarden.

Bij de Pt100 is de niet-lineariteit tussen 0 en 400°C ongeveer 3% en tussen 0 en 800°C ongeveer 7% . Bij toepassing in data acquisitiesystemen is linearisering dan ook noodzakelijk.



Figuur 3.30: Voorbeeld: Pt100 in beschermbuis.

Corrosie-tabel	Concentratie	Temperatuur [°C]	koper	messing	fosforbrons	nikkel	staal	304 (X5CrNi 18 9)	316 (X5CrNiMo 18 10)	347 (X10CrNiNb 18 9)	monel	tantal	titaan
alcoholen	elke	100						•					
ammoniak	elke	100						•	•				
azijnzuur	elke	100									•		
benzine	-						•						
boorzuur	-	200							•				
chromzuur	elke	150											
forforzuur	elke	100							•				
freon	-	150					•						
kerosine	elke	150					•						
koolstofdioxyde (nat)	-					•							
kwikchloride	10 %	25											
melk	-			•	•	•		•					
natriumchloride	30 %	150									•		
salpeterzuur	50 %	20						•				•	•
salpeterzuur	65 %	100										•	•
stoom	-							•	•	•			
water (zoet)	-		•	•			•		•	•	•		
water (zout)	-			•	•						•		
waterstofchloride (droog)	-	250,						•					
zoutzuur	1-25%	100											
zuurstof	elke	25					•						
zwaveldioxyde	-	250							•				
zwavelkoolstof	-	100						•					
zwavelzuur	elke	212											•

Tabel 3.3: Mogelijke materiaalkeuze van beschermbuizen (gegevens uit brochure van Thermo Electric).

Naast Platina komen ook *Nikkel-weerstand-opnemers* voor. Ni100 wordt gebruikt vanwege zijn grote temperatuurcoëfficiënt. Deze opnemer is bruikbaar van -60 °C tot +250 °C. In dit geval is:

$$R(T) = 100 + 0,5485.T + 6,65.10^{-4}.T^2 + 2,805.10^{-9}.T^4 - 2.10^{-15}.T^6$$

Zoals uit de formule blijkt is de lineariteit van Ni veel slechter dan van Pt. De opnemer bezit bovendien neiging tot drift in de tijd. Om deze twee redenen wordt Ni enkel bij lagere temperaturen gebruikt als de eisen op gebied van nauwkeurigheid minder hoog zijn.

Het meten

Het nauwkeurig meten van de kleine weerstandsverandering per graad Celsius gebeurt normaal met een Wheatstone-brug. De stroom door de brug (enkele mA) mag echter niet te groot zijn, anders veroorzaakt deze een temperatuurstijging en dus een fout. Een vermogen van 10 mW veroorzaakt een temperatuurstijging van 0,3 °C.

Andere oorzaken van fouten zijn de weerstandsverandering t.g.v. de temperatuur van de leidingen naar de Pt100. Immers de Pt100 bevindt zich meestal op een zekere afstand van de brug. Door het gebruik van drie draden kan dit probleem worden opgelost.

Vanwege de kleine weerstandsverandering is het spanningsverschil tussen de meetpunten zeer klein en een versterker is bijgevolg noodzakelijk. De eisen op gebied van nauwkeurigheid, stabiliteit en ruis waaraan de versterker moet voldoen zijn zeer groot.

Metten bij onevenwicht

Meestal is het zo dat de brug maar in evenwicht is voor een bepaalde temperatuur, de brug wordt dus niet voor iedere meting in evenwicht gebracht. In dit geval is de spanningswaarde van het onevenwicht afhankelijk van de voedingsspanning van de brug. De voedingsspanning moet bijgevolg zeer constant zijn. Ook mag het onevenwicht van de brug niet te groot zijn vermits er anders geen lineair verband is tussen de gemeten spanning en de verandering van de weerstand t.g.v. de temperatuur.

Vaak wordt een actieve brug gebruikt. De weerstandsverandering t.g.v. de temperatuur heeft nu geen invloed op de stroom, zodat er hier wel een lineair verband is tussen de uitgangsspanning van de versterker en de weerstandsverandering van de Pt100. De voedingsspanning moet ook hier zeer constant blijven, vermits de uitgangsspanning evenredig is met de voedingsspanning.

Voordelen

Eenvoudig, universeel en economisch meetprincipe. De sensor is demonteerbaar onder procescondities. Ook mogelijk met explosieveilige koptransmitters al dan niet met communicatiemogelijkheid voor parametrering en bewaking op afstand.

Nadelen: Niet voor meetbereiken hoger dan 650 °C

Nauwkeurigheid: 0,5 °C. abs.

16.5 Temperatuurmeting met behulp van een halfgeleider

De halfgeleider geeft een verandering in weerstand die afhankelijk is van de temperatuursverandering. Achtereenvolgens bespreken we:

- ♦ de Si-weerstand,
- ♦ thermistors,
- ♦ junctieweerstanden en
- ♦ temperatuurgevoelige stroombronnen.

Halfgeleider-temperatuur-opnemers bezitten een langdurige en hoge stabiliteit, zijn goedkoop en klein van afmeting. Halfgeleiders inclusief behuizing zijn te maken volgens klantenspecificaties. Nadelig is vaak het beperkt temperatuurbereik.

Si-massaweerstand

Si-weerstanden hebben een positieve temperatuurscoëfficiënt $\alpha = 0,7 \%$ per $^{\circ}\text{C}$. Ze zijn lineair binnen $\pm 0,5\%$ tussen -65°C en 200°C . De nominale weerstandswaarden zijn gelegen tussen 10Ω en $10 \text{ k}\Omega$ met een tolerantie van 1% tot 20% .

Deze weerstanden zien er uit als $1/4$ watt weerstanden. Als meetelement worden ze bij voorkeur in een brug geschakeld.

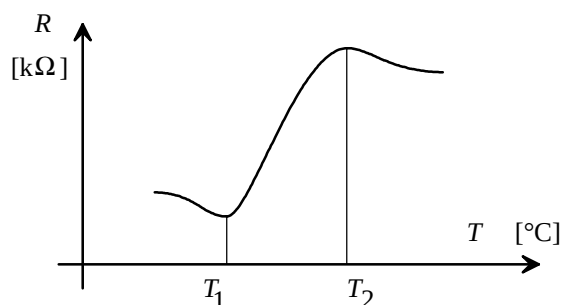
Thermistors

De geleidbaarheid $\sigma = (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p)q$. Bij een zuivere halfgeleider is $n = p = n_i$ waarbij n_i de intrinsieke concentratie is. Bij stijging van de temperatuur stijgt de dichtheid van gat/elektronen paren. Theoretisch is:

$$n_i^2 = A_0 T^3 e^{-E_{go}/kT} \quad \text{met } E_{go} \text{ de energie in [eV] vereist om een covalente binding te verbreken m.a.w. de energieafstand tussen de geleidings- en valentieband bij 0 Kelvin, } k \text{ de constante van Boltzmann in [eV/Kelvin] en } A_0 \text{ een evenredigheidsconstante.}$$

Bij thermistors gebruikt men geen Si of Ge doch wel gesinterde materialen zoals NiO , Mn_2O_3 en C_2O_3 . We onderscheiden PTC- en NTC-thermistors:

- ♦ De PTC-thermistors hebben meestal een zeer sterke stijging van de weerstand in een beperkt temperatuurgebied, m.a.w. zij hebben in dat gebied een zeer grote positieve temperatuurscoëfficiënt zoals aangegeven in figuur 3.31. Buiten het betreffende temperatuurgebied is de temperatuurcoëfficiënt negatief of nul.



Figuur 3.31: Karakteristiek van PTC-thermistor.

De PTC-thermistors worden niet zo zeer gebruikt om temperaturen te meten, doch wel om toestellen te beveiligen, bijvoorbeeld als beveiliging tegen overbelasting:

- De PTC-thermistor kan in serie geschakeld worden met de te beveiligen belasting. In normale omstandigheden is zijn weerstand laag. Bij een te grote stroom stijgt $I^2 R$ en dus de temperatuur, de weerstand wordt dan zeer groot.
- Een andere mogelijkheid is deze waarbij de PTC als temperatuurvoeler wordt gebruikt. Zo kan de PTC-voeler ingebouwd worden tussen de wikkelingen van een motor om deze te beveiligen tegen te hoge temperaturen.

Enkele kenmerkende grootheden zijn:

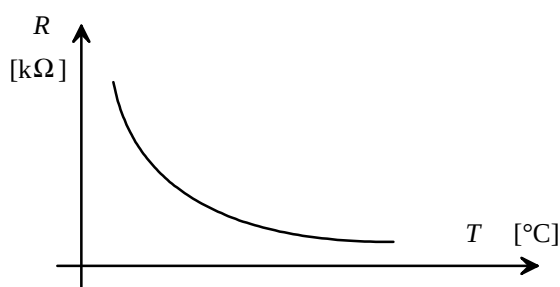
1. de weerstandswaarde bij 25 °C (bijvoorbeeld 25 Ω)
2. de schakeltemperatuur (bijvoorbeeld 75 °C)
3. de temperatuurcoëfficiënt (bijvoorbeeld 25 % / °C)
4. de thermische tijdconstante (bijvoorbeeld 20 sec)
5. de maximum toegelaten spanning (bijvoorbeeld 245 V_{RMS})

- ♦ NTC-weerstanden daarentegen hebben een vrij grote negatieve temperatuurcoëfficiënt. De relatieve weerstandsverandering per graad Celsius is merkkelijk groter dan bij een Pt100, doch is lager dan bij een PTC. Het weerstandsverloop in functie van de temperatuur is niet lineair:

$$R = R_0 e^{\beta(1/T - 1/T_0)}$$

met β een constante afhankelijk van het materiaal (≈ 4000) en T (en T_0) de absolute temperatuur in K. Figuur 3.32 geeft een typische NTC-karakteristiek weer

Er bestaan NTC's die bruikbaar zijn van -25 °C tot +125 °C. De uiterste waarden zijn -200 °C en +1000 °C. Afhankelijk van de uitvoering kan de weerstand bij 25 °C laag (4 Ω) tot zeer hoog (470 kΩ) zijn. De temperatuurcoëfficiënt is meestal ≈ -4 % / Kelvin. De thermische tijdconstante is afhankelijk van de massa (ordegrootte enkele seconden).



Figuur 3.32: Typische NTC-karakteristiek.

Junctiehalfgeleiders

Junctiehalfgeleiders zijn eveneens geschikt voor temperatuurmeting. Bij een diode is:

$$I = I_r \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad \text{of} \quad V = \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{I_r} + 1 \right) \cong \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{I_r} \right) \quad \text{bij } I \gg I_r$$

met k de constante van Boltzmann = $8,62 \cdot 10^{-5}$ eV/K ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K),
 q de lading van een elektron ($q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C en $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}$ J),
 T de temperatuur in Kelvin,
 I_r de inverse saturatiestroom,
 I de stroom door de diode en
 V de spanning over de diode.

Bijvoorbeeld: bij 300 K is $V_T = \frac{kT}{q} = 25,86$ mV.

Het junctiepotentiaal bij diodes en transistoren verandert dus over een groot temperatuurgebied. Deze verandering van junctiepotentiaal ($= dV/dT$) is

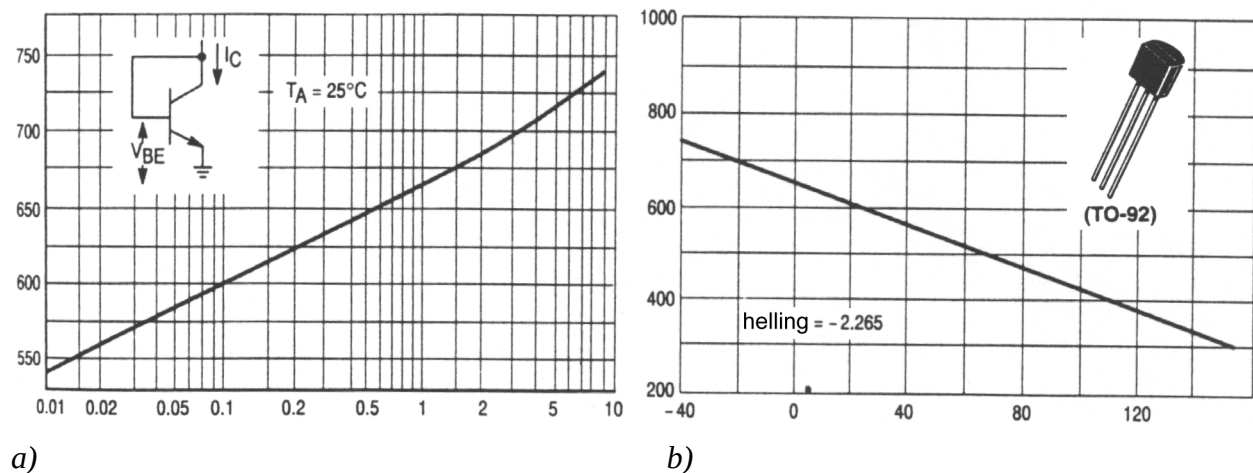
- bij Si = - 2 mV/°C
- bij Ge = - 2,5 mV/°C
- bij Schottky-diodes = -1,5 mV/°C

Bij 25°C is de typische spanningsval over de diode

- bij Si = 0,7 V
- bij Ge = 0,2 V
- bij Schottky-diodes = 0,3 V

Bijvoorbeeld: Bij 125°C en bij een constante stroom (1 mA) daalt het junctiepotentiaal met $(125 - 25) \times 2 = 200$ mV. Er staat nu $0,7 - 0,2 = 0,5$ V over de Si-diode.

Figuur 3.33 geeft de karakteristieken van de TO-92 transistor-temperatuur-opnemer.



Figuur 3.33: a) Basis-Emitter spanning V_{BE} [mV] i.f.v. de Collector-Emitter stroom I_C [mA] en
 b) Basis-Emitter spanning V_{BE} [mV] i.f.v. de omgevingstemperatuur T_A [°C].

Aangezien de diodespanning eveneens een functie is van de stroom door de diode, zal de voeding dienen te gebeuren door een constante stroombron. Om een nauwkeurige uitgangsspanning te bekomen moet de diode gekalibreerd worden of ze moet samen met een andere aangepaste diode als paar in een brug worden opgenomen. Afhankelijk van de toepassing bedraagt de thermische tijdconstante enkele seconden.

Temperatuurgevoelige stroombron (IC)

Er bestaan eveneens temperatuurgevoelige stroombronnen. Dit zijn meestal relatief complexe (IC) schakelingen, waarbij een stroom vloeit die lineair stijgt met de temperatuur. De stroom is van de orde $\mu\text{A/Kelvin}$.

Een voorbeeld van zo een IC is het type AD590 van Analog Devices. De uitgangsstroom is $1 \mu\text{A/Kelvin}$ wanneer de voeding gelegen is tussen $+4\text{V}$ en $+30\text{V}$ en dit in een temperatuurgebied van -55°C tot $+150^\circ\text{C}$.

16.6 Stralingstemperatuurmeting (of pyrometrie)

Alle objecten boven het absolute nulpunt (-273°C) stralen een infraroodenergie uit. Infraroodmeters meten de hoeveelheid uitgestraalde infraroodenergie als maat voor de temperatuur.

De infraroodmeter registreert met behulp van een lens het temperatuurverschil tussen object en meter. Dit gebeurt door het meten van de thermo-elektrische spanning die de infraroodstraling van het te meten object veroorzaakt.

De belangrijkste *voordelen* zijn:

- Het contactloos meten van oppervlakte temperaturen.
- Toepasbaar voor hoge meetbereiken.
- De temperatuur van bewegende objecten kunnen worden gemeten, zoals walsen, lassen en naden of onderdelen in machines. Onhandig geplaatste of gevaarlijke objecten, bijvoorbeeld zuren, kunnen worden gecontroleerd. Ook de temperatuur van objecten met een lage thermische massa is te meten zoals bladeren van planten of hele delicate apparatuur.

De belangrijkste *nadelen* zijn:

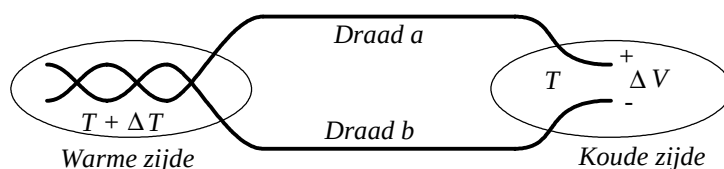
- De temperatuur van glimmende voorwerpen is moeilijk te meten t.g.v. reflectie. In dergelijke gevallen is de meting minder nauwkeurig dan conventionele meetmethoden.
- Alleen metingen van oppervlaktetemperatuur zijn mogelijk.

Infraroodmeters worden toegepast in bereiken van -46°C tot 2500°C . Hun nauwkeurigheid bedraagt maximaal $1,0^\circ\text{C}$ absoluut.

16.7 Thermokoppels

Het Seebeck-effect

Indien twee geleiders *a* en *b* aan een uiteinde samengevoegd worden en indien er een temperatuurverschil ΔT is tussen deze plaats (de warme las) en het ander koude einde (zie figuur 3.34) dan ontwikkelt zich op de koude plaats een open-circuit spanning ΔV tussen de open uiteinden van de geleiders; dit is het thermokoppel.



Figuur 3.34: Thermokoppel-principe: Seebeck-effect.

Dit effect, "Seebeck-effect" genoemd, naar de ontdekker ervan T. J. Seebeck, is mathematisch uit te drukken als:

$$\Delta V = \alpha_s \Delta T$$

waarbij α_s de Seebeck-coëfficiënt voorstelt in V/K (of meer gebruikelijk in $\mu\text{V/K}$).

Het Seebeck-effect is de som van het Peltiër-effect en het Thomson-effect, dit laatste is evenwel veel kleiner dan het eerste:

$$E = C_1(T_1 - T_2) + C_2(T_1^2 - T_2^2)$$

Peltiër-effect Thomson-effect

Voor koper-constantan is $E = 37,5 (T_1 - T_2) - 0,045 (T_1^2 - T_2^2)$, waarbij T_1 en T_2 de absolute junctietemperatuur in Kelvin en E de spanning in μV

Metalen	α_s [$\mu\text{V/K}$] bij 273 K	α_s [$\mu\text{V/K}$] bij 300 K	Thermo- koppels	α_s [$\mu\text{V/K}$] bij 273 K	α_s [$\mu\text{V/K}$] bij 300 K
Pb	-0,995	-1,047	Type J	50,000	51,000
Cu	1,700	1,830	(Fe / Cu-Ni)		
Ag	1,380	1,510	Type K	39,000	41,000
Au	1,790	1,940	(Ni-Cr / Ni-Al)		
Pt	-4,450	-5,280	Type R	5,000	6,000
Pd	0,900	-9,990	(Pt - 13 % Rh / Pt)		
W	0,130	1,070	Type S	5,000	7,000
Mo	4,710	5,570	(Pt - 10 % Rh / Pt)		
Cr	18,800	17,300	Type T	39,000	41,000
V	0,130	1,000	(Cu / Cu-Ni)		
Rh	0,480	0,400			
Ni	-18,000				
Al		-1,700			

Tabel 3.4: De absolute Seebeck-coëfficiënt voor enkele thermokoppels.

Bovenstaande formule klopt in de praktijk niet helemaal zodat men vaak empirisch te werk gaat. Er is gebleken dat alleen een combinatie van twee verschillende materialen, een zogenaamd thermokoppel, het Seebeck-effect teweeg brengt. Voor twee draden van hetzelfde materiaal is als gevolg van symmetrie geen Seebeck-effect waar te nemen, het is echter wel aanwezig.

De Seebeck-coëfficiënt

De Seebeck-coëfficiënt α_s is afhankelijk van de chemische samenstelling van het materiaal en van de temperatuur. De coëfficiënt is voor enkele metalen en thermokoppels gegeven in tabel 3.4 bij 273 K en 300 K.

Hogere waarden van de coëfficiënt zijn gemeten voor halfmetalen (zoals bismut) en voor halfgeleiders, waardoor ze beter geschikt zijn voor praktische toepassingen.

Daar de Seebeck-coëfficiënt temperatuurafhankelijk is, dienen thermokoppels te worden gekalibreerd over het gebruikte temperatuurgebied.

Voornaamste thermo-elektrische wetten

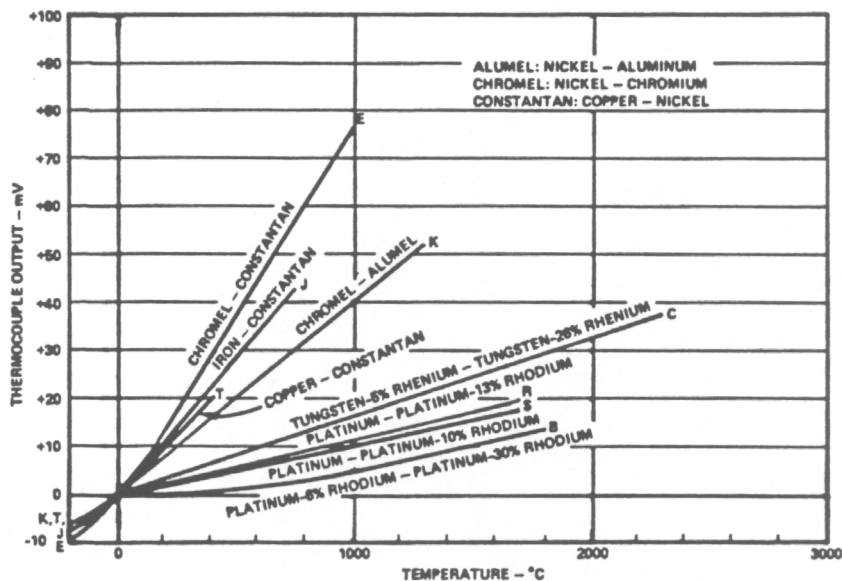
Er gelden volgende thermo-elektrische wetten:

1. De thermokoppelspanning wordt niet beïnvloed indien een derde metaal in een van de twee geleiders of tussen de draden van de warme las wordt geschakeld op voorwaarde dat de bijkomende juncties op gelijke temperatuur blijven. De grootte van het contact-potentiaal is uitsluitend afhankelijk van de temperatuur en niet van het contactoppervlak.
2. De totale thermokoppelspanning van in serie geschakelde thermokoppels is gelijk aan de som van de spanningen van de verschillende afzonderlijke thermokoppels. $E_{AC} = E_{AB} + E_{BC}$. Dit geldt zowel voor thermokoppels van dezelfde als voor thermokoppels van verschillende soort.
3. Indien een thermokoppel een emk E_1 bij junctietemperaturen T_1 en T_2 , en een emk E_2 bij junctietemperaturen T_2 en T_3 heeft, dan is bij junctietemperaturen T_1 en T_3 de emk $E_1 + E_2$. Volgens de eerste wet hebben de verbindingsdraden tussen de koude juncties en de voltmeter geen invloed als zij maar op dezelfde temperatuur worden gehouden.

Volgens diezelfde wet mogen de thermokoppeljuncties gesoldeerd worden. De zogenaamde koude las is normaal de referentiejunctie, wanneer deze koude las zich niet op 0 °C bevindt, kan de laatste wet toegepast worden.

Thermokoppels

De thermokoppels die veelal in de industrie gebruikt worden, zijn in tabel 3.5 weergegeven. Het meest gebruikte thermokoppel is Chromel-Alumel (Type K), het is niet alleen bruikbaar tot tamelijk hoge temperaturen (tot 1200 °C), maar het is bovendien vrij lineair. De spanning is ongeveer 40 μ V/K (zie tabel 3.). Andere vaak gebruikte thermokoppels zijn ijzer/constantaan (type J) en koper/constantaan (Type T); ze zijn bestand tegen zeer hoge temperaturen. De temperatuur/spanning relatie is niet geheel lineair maar wel zeer reproduceerbaar. De thermokoppeltemperatuursensoren zijn, afhankelijk van het toegepaste type, leverbaar in (deel-) bereiken van -40 °C tot + 1600 °C.



Figuur 3.35: Thermokoppelspanningen als functie van de temperatuur voor enkele thermokoppels

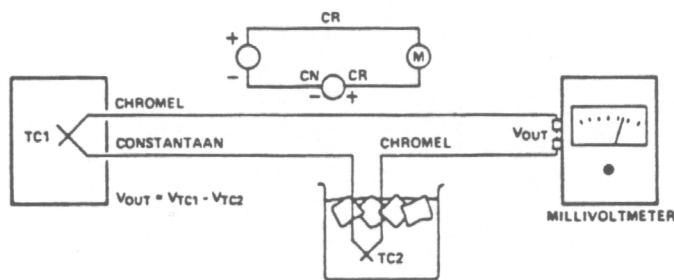
	Type	Temp. Bereik [°C]	Gevoel. [$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$]	Eigenschappen
T	Koper-Constantaan (Cu-CuNi)	-40/350	≈ 40	- nauwkeurig ($\pm 1^\circ\text{C}$ of $\pm 1\%$) - voor lage temp.(tot -200°C)
J	Ijzer-Constantaan (Fe-CuNi)	-40/750	≈ 50	- goedkoop
E	Chromel-Constantaan (NiCr-CuNi)	-40/900	≈ 60	- grote gevoeligheid
K	Chromel-Alumel (NiCr-NiAl)	-40/1200	≈ 40	- lineair - groot temperatuurgebied
N	Nicrosi-Nisil (NiCrSi-NiSi)	-40/1200	≈ 36	- lineair (vergelijk met K)
S	Platina-PtRh10 (Pt - PtRh 10 %)	0/1600	≈ 9	- voor hoge temp. - niet lineair
R	Platina-PtRh13 (Pt - PtRh 13 %)	0/1600	≈ 9	- voor hoge temp. - niet lineair
B	PtRh6-PtRh30	600/1700	≈ 5	- voor hoge temp.

Tabel 3.5: Essentiële eigenschappen van enkele thermokoppels.

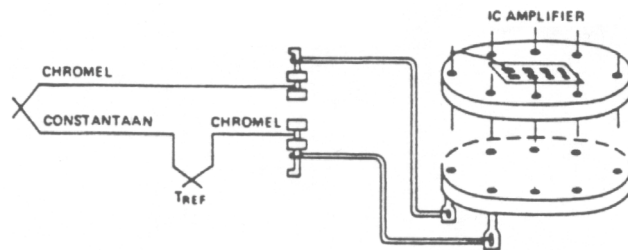
Metten van de thermokoppelspanning

Daar de thermische emk een DC-spanning is van de orde mV, dient zij te worden versterkt met een versterker met een zeer kleine offset-spanning.

De referentietemperatuur is meestal 0°C . Een referentiethermokoppel in een smeltend ijsbad of het gebruik van een compensatiespanning in serie met het thermokoppel kunnen hiervoor worden gebruikt.



Figuur 3.36: Temperatuurmeting met ijsbad als referentietemperatuur



Figuur 3.37: Temperatuurmeting met twee thermokoppels (meetpunt en referentie), met bijkomende thermokoppels t.g.v. materiaalovergangen : aan iedere verbindingsklem: chromel-brons, brons-tinverbinding, tin-kopperleiding; aan de voet: tweemaal koper-tin, tin-rhodium/staal, rhodium/staal-kovar; en aan de versterker: tweemaal kovar-goud, goud-aluminium, aluminium-silicium.

Er bestaan ook IC's, bijvoorbeeld de types AD594/5/6/7 van Analog Devices, die het signaal van het thermokoppel versterken tot 10 mV / °C en die inwendig een ijspunt compensatie hebben. Deze IC's hebben ook een alarm uitgang.

Voordelen

- Eenvoudig, universeel en economisch meetprincipe.
- De sensor is demonteerbaar onder procescondities.
- Ook mogelijk met explosieveilige koptransmitters of koptransmitters met communicatiemogelijkheid voor parametring en bewaking op afstand.
- Geschikt voor zeer hoge temperaturen.

Nadelen

- Wanneer geen koptransmitter wordt toegepast, is een kostbare compensatiekabel nodig.
- Niet geschikt voor lagere temperaturen.

Toepassingsvoorbeeld

Toepassingen situeren zich vooral bij het meten van hoge temperaturen bv. voor regeling van smeltbaden en gietprocessen. De nauwkeurigheid is ± 2 °C absoluut.

Het thermokoppel wordt echter ook gebruikt als beveiliging o.a. bij atmosferische gasketels. De warmte van de waakvlam verwarmt het thermokoppel dat op zijn beurt de gasklep openhoudt. De waakvlam is een kleine gasvlam die de atmosferische brander ontsteekt wanneer er warmte door de ketel moet geleverd worden. Als de waakvlam om een of andere reden dooft, zal de gasklep sluiten zodat er geen ontplofbaar gas de stookplaats zou vullen.

16.8 Vergelijkend overzicht

Tabel 3.6 geeft tenslotte een vergelijkend overzicht van de belangrijkste temperatuurmeetmethoden.

Eigenschap	Thermokoppel	Weerstand	Thermistor
Stabiliteit (drift)	1 °C drift /jaar	minder dan 0,1 °C /jaar	0,1 °C tot 3 °C/jaar
Gevoeligheid	10 tot 50 V/°C	0,2 tot 10 Ω/°C	100 tot 100 Ω/°C
Temperatuurbereik	-180 °C tot 1700 °C	-260 °C tot 850 °C	-100 °C tot 290 °C
Uitgangssignaal	0 tot 60 mV	1 tot 6 V	1 tot 3 V
Vermogendissipatie	$1,6 \cdot 10^{-7}$ W	0,04 W	0,81 W
Prijs	35 - 125 Euro	75 - 200 Euro	1 - 5 Euro
Lineariteit	(zeer) goed	zeer goed	slecht
Speciale kenmerken	grootst temp.bereik	zeer nauwkeurig en stabiel	

Tabel 3.6: *Vergelijkend overzicht.*