

# Mjerenja u tehnici

## II dio

prof.dr.sc. Frano Barbir

Katedra za termodinamiku, termotehniku i toplinske strojeve  
soba 708

Tel. 305-889

E-mail: [Frano.Barbir@fesb.hr](mailto:Frano.Barbir@fesb.hr)

Konzultacije: Ponedjeljak 11-12 ili po dogovoru

Asistent: Ivan Tolj, dipl.ing., znanstveni novak

# Mjerenja u tehnici

## II dio

### Sadržaj

Mjerenje temperature

Mjerenje tlaka

Mjerenje brzine strujanja fluida

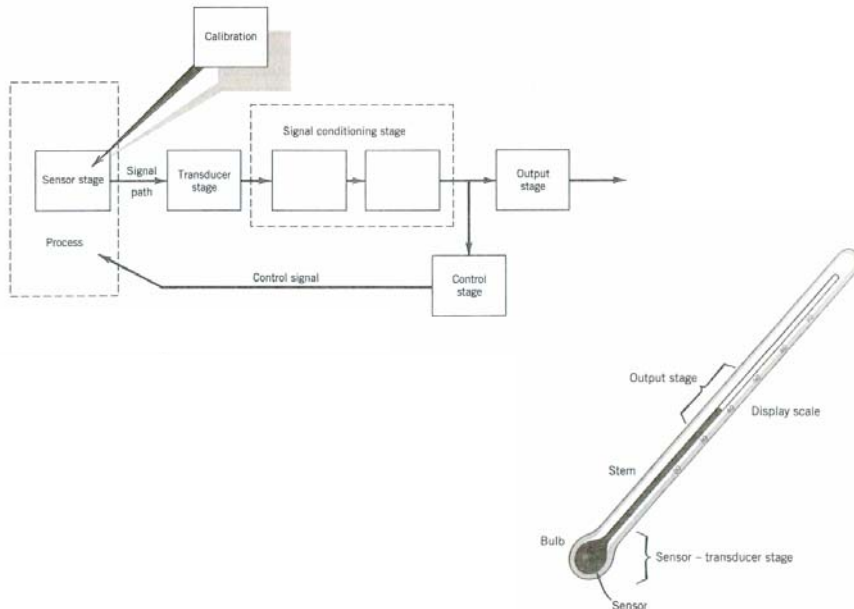
Mjerenje protoka

Mjerenje vlažnosti

Mjerenje toplinske energije

i ostala toplinska mjerenja

## Dijelovi općenitog mjernog sustava



## Neki pojmovi iz mjerenja

- ✦ Raspon
- ✦ Točnost
- ✦ Preciznost
- ✦ Bias
- ✦ Osjetljivost

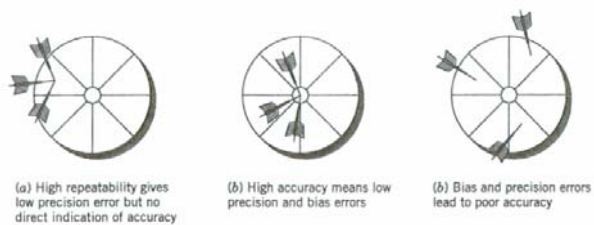


Figure 1.8 Throws of a dart: illustration of precision and bias errors and accuracy.

Utjecaj mjerenja na mjerenu veličinu  
(primjer mjerenje brzine i temperature u kanalu malog popre č nog presjeka)

Nije problem u onome što ne znamo,  
nego je problem u onome što (mislimo da) znamo  
a to nije tako! – Mark Twain

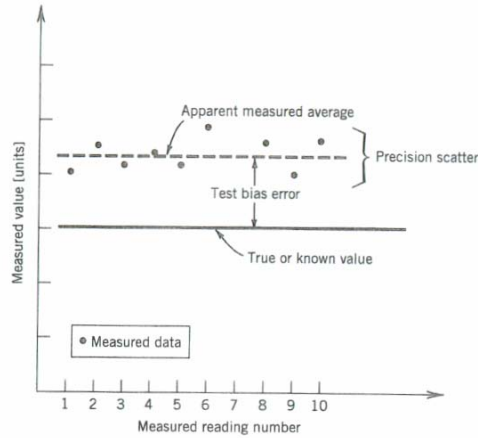
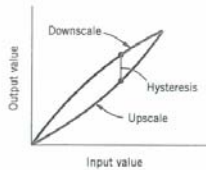
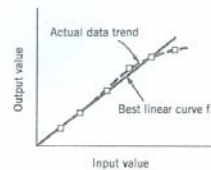


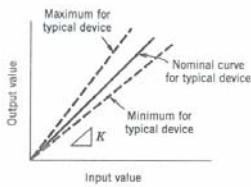
Figure 1.9 Effects of precision and bias errors on calibration readings.



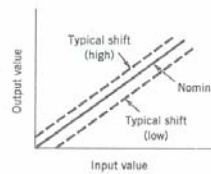
(a) Hysteresis error



(b) Linearity error

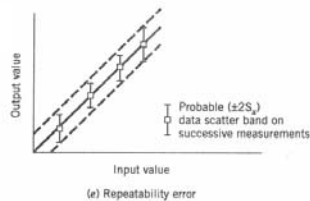


(c) Sensitivity error



(d) Zero shift (null) error

### Primjeri griješaka u mjerenju



(e) Repeatability error

# Mjerenja u tehnici

II dio

## Sadržaj

Mjerenje temperature

Mjerenje tlaka

Mjerenje brzine strujanja fluida

Mjerenje protoka

Mjerenje vlažnosti

Mjerenje toplinske energije

i ostala toplinska mjerenja

Temperatura je jedna od najvažnijih i najčešće mjerenih veličina u tehnici

Temperatura zraka je nešto s čime se srećemo svaki dan

-Dnevne promjene

-Sezonske promjene

Temperatura ljudskog tijela

Temperatura tekućine za hladjenje motora u automobilu

## Definicije temperature

Laička definicija:

Temperatura je mjera topline ili hladnoće neke tvari ili nekog tijela

Nulti zakon termodinamike:

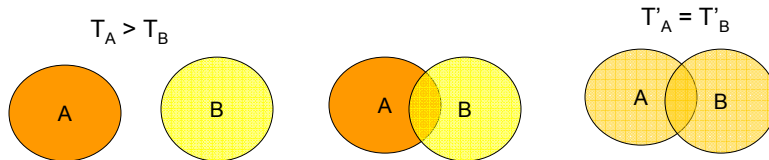
Ako su dva tijela u termalnoj ravnoteži s trećim tijelom onda su u termalnoj ravnoteži izmedju sebe.

Ako su dva tijela ili sustava u termalnoj ravnoteži onda imaju istu temperaturu.

Temperatura je veličina koju ima istu vrijednost u dva sustava koja su u termalnom kontaktu i pusti ih se dođu u termalnu ravnotežu.

Što je to termalna ravnoteža? Nema prelaza topline s jednog tijela na drugo.

Termalna ravnoteža



Utjecaj mjerenja na mjerenu veličinu

Temperatura je veličina koju ima istu vrijednost u dva sustava koja su u termalnom kontaktu i pusti ih se dođju u termalnu ravnotežu.

Na osnovu ove definicije razumijemo razliku temperatura  
Ali mozemo li reći ovo tijelo ima temperaturu dva puta veću?  
(usporedba s dužinom ili masom ili vremenom)

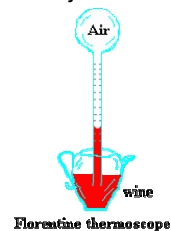
## Indirektno mjerenje temperature

Za mjerenje temperature koristimo njen efekt na:

- Volumen (plinova)
- Rastezanje (tekućina ili metala)
- Tlak
- Električni otpor
- Termo-električni efekt
- Energiju zračenja
- Promjenu kemijske faze

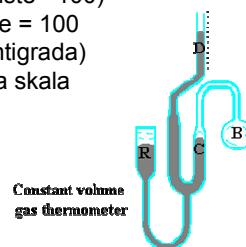
## Povijest mjerenja temperature

- Galen (A.D. 130-200) – klinička termometrija, razvrstava ljude po udjelu topline, hladnoće, vlaznosti i suhoće(??)  
Uvodi pojam standardne ili neutralne temperature koja bi se postigla mješanjem jednakih količina vrijuće vode i leda.  
(Koja bi se temperatura time postigla? Zašto?)  
Na svaku stranu postavlja četiri stupnja topline i četiri stupnja hladnoće.
- Hasler iz Berna (1578), prema Galenu također koristi četiri stupnja topline za ljude koji žive na ekvatoru i četiri stupnja topline za ljude koji žive u polarnim krajevima.
- Santorio iz Padove (1612) - Prvi opis termometra; navodno ga je izumio Galileo (1592) (koristio je rastezanje zraka – termobarometar (zašto?))
- Jean Rey (1632) – prvi termometar s tekućinom (vodom) u otvorenoj staklenoj cijevi
- Ferdinand II (veliki vojvoda od Toskane) (1641) – prvi zatvoreni termometar s alkoholom u staklenoj cijevi i s podjelom na 50 stupnjeva



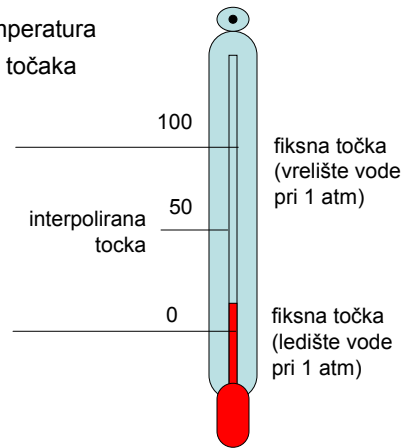
## Povijest mjerenja temperature (nastavak)

- Robert Hooke (1664) – bojani alkohol u zatvorenoj cijevi s temperaturom leda kao početnoj vrijednosti na skali; uvodi skalu od -7 do +13 stupnjeva (svaki stupanj otprilike 2.4 °C); početak meteoroloških mjerenja
- Fahrenheit (1708-1724) – uvodi živu u staklenoj cijevi; postavlja skalu sa dvije fiksne točke: 96 stupnjeva za temperaturu ljudskog tijela i 32 stupnja za temperaturu zamrzavanja vode
- Amontons razvija plinski termometar s konstantnim volumenom plina; ustanovljava da se temperatura u Parizu ljeti prema temperaturi zimi odnosi kao 6:5; zaključuje da bi najniža moguća temperatura odgovarala tlaku zraka  $P=0$ .
- Anders Celsius (1701-1744) uvodi skalu koja dijeli razmak između vrenja i ledišta vode na 100 jednakih dijelova (vrenje = 0 i ledište = 100)
- Carolus Linnaeus 1745 obrće skalu ledište = 0 i vrenje = 100 (skala centigrada)
- Tek 1948 usvaja se Celsiusev stupanj °C i Celsiuseva skala



### 3 osnovna aspekta temperaturne skale

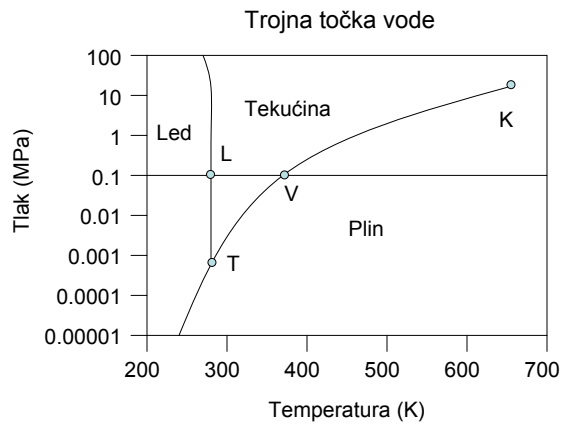
- 1) Definicija veličine jednog stupnja
- 2) Fiksne referentne točke poznatih temperatura
- 3) Način interpolacije između tih fiksnih točaka



### Standard ITS-90

1 K = 1/273.16 temperature trojne točke vode

$$^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273.15$$





## Temperaturne fiksne točke prema standardu ITS-90

Definirajuća točka	Temperatura	
	K	°C
Trojna točka vodika	13.803	-259.3467
Tekućina-plin ravnoteža vodika (25/76 atm)	~17	~ -256.15
Tekućina-plin ravnoteža vodika (1 atm)	~20.3	~ -252.87
Trojna točka neona	24.556	-248.5939
Trojna točka kisika	54.3548	-218.7916
Trojna točka argona	83.8058	-189.3442
Trojna točka vode	273.16	0.01
Krutina-tekućina ravnoteža galijuma (1 atm)	302.9146	29.7646
Krutina-tekućina ravnoteža kositra (1 atm)	505.078	231.928
Krutina-tekućina ravnoteža cinka (1 atm)	692.677	419.527
Krutina-tekućina ravnoteža srebra (1 atm)	1234.93	961.78
Krutina-tekućina ravnoteža zlata (1 atm)	1337.33	1064.18
Krutina-tekućina ravnoteža bakra (1 atm)	1357.77	1084.62

Interpolacija između 13.8033 K i 1234.93 K se vrši otpornim termometrom na bazi platine  
Iznad 1234.93 K temperatura se definira zračenjem crnog tijela (instrument nije specificiran)

Tabela: Celsius/Kelvin/Fahrenheit/Rankine

Jednadžbe za preračunavanje

$$F = 9/5 C + 32$$

$$C = 5/9 (F - 32)$$

$$F = R - 459.67$$

$$C = K - 273.15$$

$$R = 1.8 K$$

°C	K	°F	R
-273.15	0	-459.67	0
-200	73.15	-328	131.67
-100	173.15	-148	311.67
-50	223.15	-58	401.67
-40	233.15	-40	419.67
-30	243.15	-22	437.67
-20	253.15	-4	455.67
-10	263.15	14	473.67
0	273.15	32	491.67
10	283.15	50	509.67
20	293.15	68	527.67
30	303.15	86	545.67
40	313.15	104	563.67
50	323.15	122	581.67
60	333.15	140	599.67
70	343.15	158	617.67
80	353.15	176	635.67
90	363.15	194	653.67
100	373.15	212	671.67
150	423.15	302	761.67
200	473.15	392	851.67
250	523.15	482	941.67
300	573.15	572	1031.67
400	673.15	752	1211.67
500	773.15	932	1391.67
600	873.15	1112	1571.67
800	1073.15	1472	1931.67
1000	1273.15	1832	2291.67



## Termometri na bazi rastezanja tekućina u staklu



Poželjne karakteristike tekućina:

1. Veza između temperature i rastezanja bi trebala biti linearna
2. Tekućina bi trebala imati što veći koeficijent rastezanja (alkohol je bolji od žive)
3. Tekućina bi trebala omogućiti mjerenje širokog raspona temperature (živa je ograničena temperaturom taljenja,  $-38.9$ ; alkoholi su ograničeni temperaturom vrenja)
4. Tekućina bi trebala biti jasno vidljiva u uskoj kapilari (živa je vidljiva; alkoholu treba dodati boju)
5. Tekućina ne bi smjela prijanjati uz stijenke (živa je bolja od alkohola)

## Toplinsko istezanje žive (prostorno):

$$V(t)/V_0 = (1 + 1.82 \times 10^{-4} t + 7.8 \times 10^{-9} t^2)$$

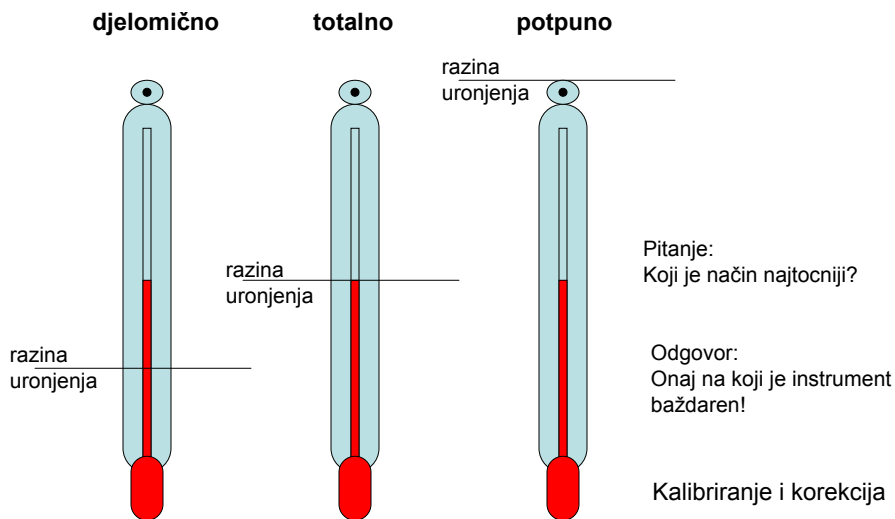
$$\Delta V/V \approx \beta \Delta T \quad \beta = \text{prostorni koeficijent}$$

$$\beta \approx 0.000182 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \text{ K}) \quad (273\text{-}373\text{K})$$

$$\beta \approx 3\alpha \quad \alpha = \text{dužinski koeficijent}$$

Zadatak: izračunaj koliki treba biti promjer kapilare ako želimo da se živa podigne 1 mm za svaki  $^{\circ}\text{C}$  promjene temperature. Volumen žive u spremniku je  $0.1 \text{ cm}^3$

## Termometri na bazi rastezanja tekućina u staklu



## Termometri na bazi rastezanja tekućina u staklu

### Korekcija

$$T = T_O + \beta N (T_b - T_c)$$

$T$  = ispravna temperatura

$T_O$  = očitana temperatura

$T_b$  = temperatura pri kojoj je termometar baždaren za djelomično uronjene

( $T_b = T_O$  za kompletno uronjene termometre)

$T_c$  = prosječna temperatura visine stupca iznad linije uronjenja

$N$  = visina stupca fluida iznad linije uronjenja (izraženo u stupnjevima)

$\beta$  = toplinski koeficijent rastezanja

(zapravo razlika između toplinskog rastezanja žive i stakla)

Za živin termometar  $\beta = 0.00016$

### Tri primjera:

- Totalno uronjen termometar pri baždarenju djelomično uronjen pri mjerenju
- djelomično uronjen termometar pri baždarenju uronjen isto ali pri drugoj temperaturi stupca
- Djelomično uronjen termometar pri baždarenju uronjen do druge visine pri mjerenju

## Termometri na bazi rastezanja tekućina u staklu

Tocnost +/- 0.01 °C

Osjetljivost: 0.1 °C/atm

S vremenom mu točnost opada. Zašto?

Pouzdanost: +/- 0.2 do +/- 2 °C

Brzina: ovisi o veličini (promjeru) spremnika i vremenskoj konstanti termometra

Vremenska konstanta živinog termometra s spremnikom promjera 5 mm

Medij	u mirovanju	0,5 m/s	∞
Voda	10s	2.4s	2.2s
Ulje	40s	4.8s	2.2s
Zrak	190s	71s	2.2s

Vremenska konstanta termometra je omjer između toplinskog kapaciteta i toplinske vodljivosti termometra.

Vrijeme potrebno da termometar reagira na promjenu temperature.

Recimo:

$$\Delta T_m = (T_s - T_{to}) \exp(-\tau/\tau_o)$$

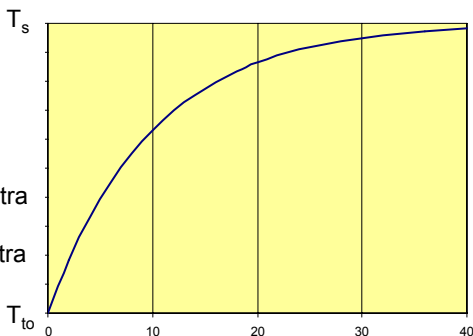
$\Delta T_m$  = griješka mjerenja

$T_s$  = temperatura sustava

$T_{to}$  = početna temperatura termometra

$\tau$  = vrijeme od početka mjerenja

$\tau_o$  = vremenska konstanta termometra

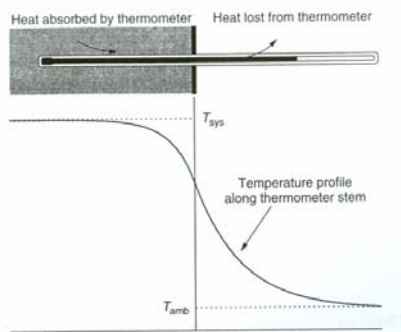


Za svaki interval od  $\tau_o$  sekunda griješka se smanjuje za ~63%

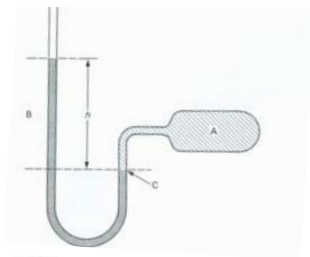
## Termometri na bazi rastezanja tekućina u staklu

### Moguće griješke pri mjerenju

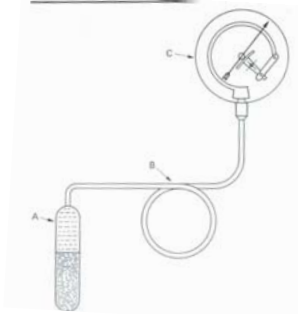
- ✦ Vrijeme mjerenja
- ✦ Promjena tlaka
- ✦ Promjena volumena spremnika
- ✦ Neujednačenost promjera kapilare
- ✦ Tekućina prijanja uz stijenke
- ✦ Odvajanje tekućine u kapilari
- ✦ Griješka u čitanju
- ✦ Griješka pri uranjanju



## Termometri sa stlačenim plinom ili tekućinom



Konstantan volumen  
Radni plin vodik ili helij  
Stupac žive  
Koristi se samo u laboratorijima



Umjesto živom pritisak se može mjeriti manometrom

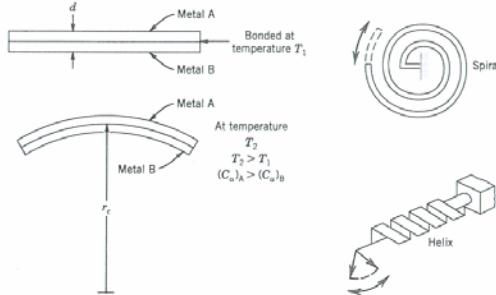
$$PV = nRT$$

Mogu biti ispunjeni:  
Potpuno tekućinom  
Potpuno plinom  
Kombinacija tekućina-para

Moguće griješke u razlici temperatura cijevi (ne kod pare)

## Bimetalni termometar

Bazira se na razlici linearnog termalnog koeficijenta istezanja dvaju metala



Invar:  $\alpha = 1.7 \times 10^{-8} \text{ m/m K}$   
 Drugi metali:  $\alpha = 2 \times 10^{-5} \text{ do } 2 \times 10^{-4} \text{ m/m K}$

Pouzdanost: +/- 1 °C

$$R_c = \frac{d}{(\alpha_A - \alpha_B)(T_2 - T_1)}$$

$R_c$  = radijus  
 $d$  = debljina bimetala  
 $T$  = temperatura  
 $\alpha$  = termalni koeficijent istezanja

## Otporni termometri RTD (resistance temperature detectors)

Otpor:  $R = \rho L/A$

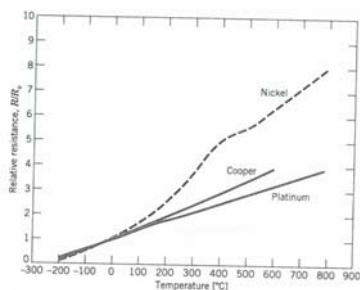
$R$  = el. otpor (Ohm)  
 $\rho$  = spec. otpor materijala (ohm cm)  
 $L$  = dužina (cm)  
 $A$  = popriječni presjek (cm<sup>2</sup>)

Otpor kao funkcija temperature:

$$R = R_0 [1 + a(T - T_0) + b(T - T_0)^2 + \dots]$$

Linearna relacija:

$$R = R_0 [1 + a(T - T_0)]$$



Koeficijent a pri 20 °C

Tvar	a [ °C <sup>-1</sup> ]
Aluminij	0.00429
Ugljik	- 0.007
Bakar	0.0043
Zlato	0.004
Željezo	0.00651
Olovo	0.0042
Nikal	0.0067
Ni-krom	0.00017
Platina	0.00329
Wolfram	0.0048

## RTD (resistance temperature detectors)

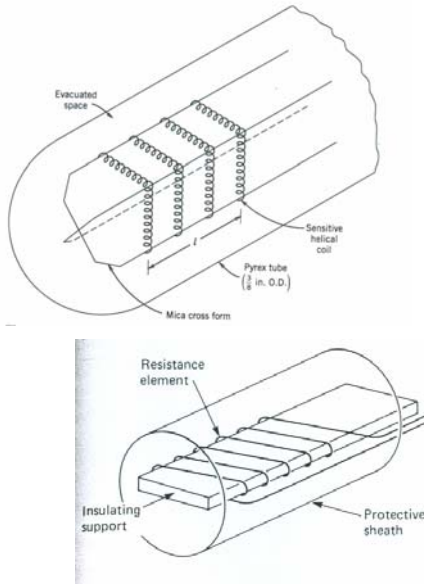


Figure 16.4 Installation assembly for an industrial-type resistance thermometer



## Mjerenje s RTD

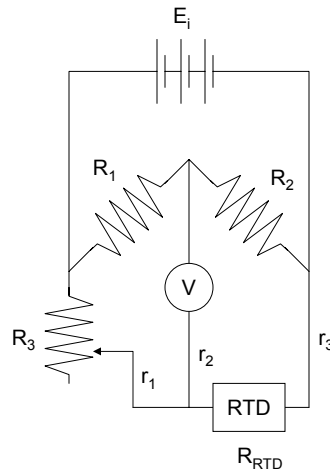
$$R_1/R_2 = R_3/R_{RTD}$$

Ako se uzme u obzir otpor u žicama:

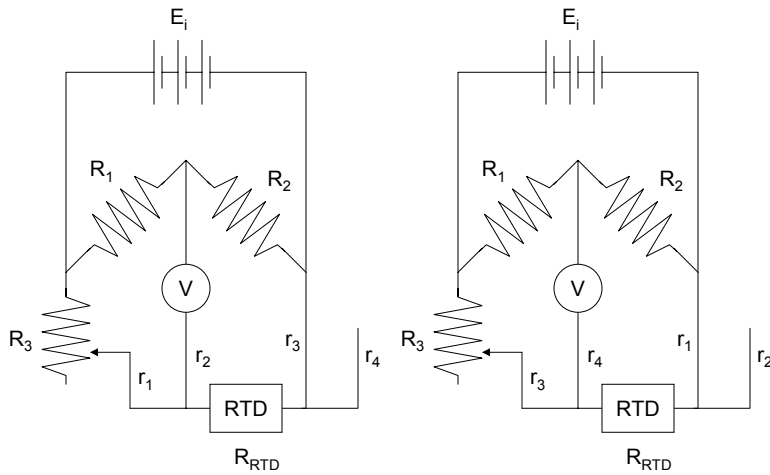
$$R_1/R_2 = (R_3 + r_1) / (R_{RTD} + r_3)$$

$$R_1 = R_2 \quad R_{RTD} = R_3 + r_1 - r_3$$

Wheatstonov most  
Callender-Griffits most s tri žice

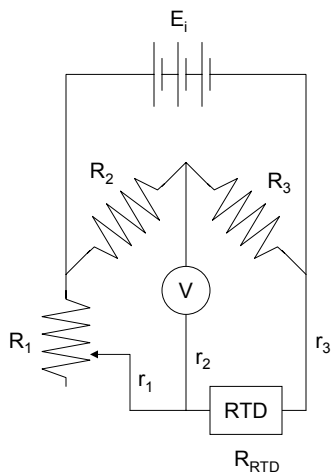


## Mjerenje s RTD



$$R_{RTD} = (R_{3,1} + R_{3,2})/2$$

Primjer:



Zadano:

$$R_2 = R_3 = 25 \Omega$$

$$R_{RTD} = 25 \Omega \text{ pri } 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

RTD materijal: Pt

Izmjereno:

$$R_1 = 37.76 \Omega$$

Zadatak: odredi mjerenu temperaturu

$$R_{RTD} = R_1 R_3 / R_2 = 37.76 \Omega$$

$$R_{RTD} = R_{RTD,0} [1 + a (T - T_0)]$$

$$37.76 = 25 [1 + 0.003927 (t - 0)]$$

$$t = 126 \text{ } ^\circ\text{C}$$



## Praktične primjedbe u vezi mjerenja s RTD

Spor odziv (zašto?)  
Izuzetak vrlo mali RTD s Pt promjera 0.1 mm  
za mjerenje temperature u struji nekorozivnih plinova

Tanki filmovi 1-2  $\mu\text{m}$  za mjerenje temperatura i do 600 °C  
Točnost: +/- 0.5 do +/- 2 °C

### Moguće griješke

Neispravno uronjenje  
Vremenska konstanta  
Utjecaj radijacije  
Grijanje uslijed vlastitog otpora  
Mehanički šok i vibracije  
Termarno rastezanje  
Kontaminacija  
Strujni gubici kroz izolaciju  
Otpor u žicama  
Termoelektrični efekt  
Stabilnost referentnog rezistora

$$\Delta T = R_{\text{RTD}}(t) I^2 / h$$

h = disipacijski koeficijent

Medij	h (mW K <sup>-1</sup> )	griješka* (mK)
Zrak (u mirovanju)	1-10	10-100
Voda (u mirovanju)	2-400	0.25-50
Protok vode	10-1000	0.1-10

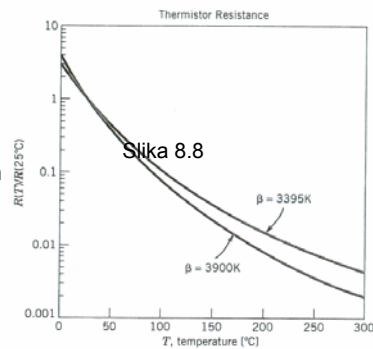
\* Za 100  $\Omega$  element i 1 mA struja

## Termistori

### Termalno osjetljivi rezistori

Otpor im eksponencijalno opada s temperaturom

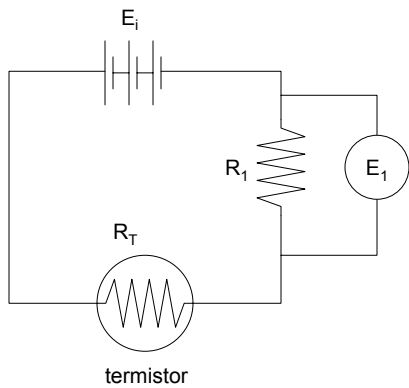
$$R = R_0 \exp [\beta (1/T - 1/T_0)]$$



Koeficijent  $\beta = 3500 - 4600$  (ovisno o materijalu, konstrukciji, pa i temperaturi)

Pri baždarenju se mora ustanoviti ovisnost koeficijenta  $\beta$  o temperaturi.

Imaju znatno veći otpor nego RTD – nema problema s otporom žica



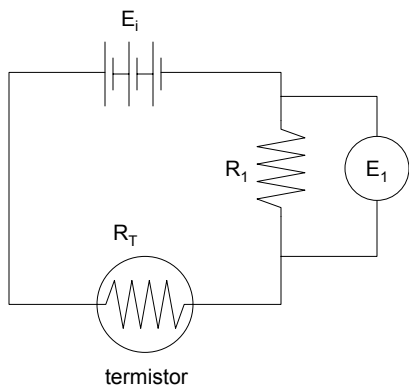
Primjer:

Zadano:  $R_0 = 60.000 \Omega$   
 $E_i = 1.564 \text{ V}$   
 $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $R_1 = 130.5 \text{ k}\Omega$

Zadatak: odrediti  $\beta$  u rasponu temperatura od 100 do 150  $^\circ\text{C}$

Izmjereno:

T [ $^\circ\text{C}$ ]	$E_1$ [V]
100	1.501
125	1.531
150	1.545



Primjer:

Zadano:  $R_0 = 60.000 \Omega$   
 $E_i = 1.564 \text{ V}$   
 $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $R_1 = 130.5 \text{ k}\Omega$

Zadatak: odrediti  $\beta$  u rasponu temperatura od 100 do 150  $^\circ\text{C}$

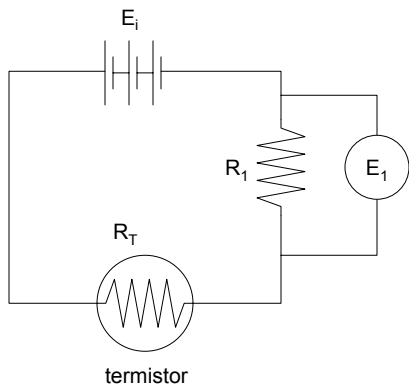
Izmjereno:

T [ $^\circ\text{C}$ ]	$E_1$ [V]
100	1.501
125	1.531
150	1.545

Rješenje:

Odredi  $R_T$ :  $R_T = R_1 (E_i/E_1 - 1)$

Odredi  $\beta$ :  $\ln (R_T/R_0) = \beta (1/T - 1/T_0)$



Primjer:

Zadano:  $R_0 = 60.000 \Omega$   
 $E_i = 1.564 \text{ V}$   
 $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $R_1 = 130.5 \text{ k}\Omega$

Zadatak: odrediti  $\beta$  u rasponu temperatura od 100 do 150  $^\circ\text{C}$

Izmjereno:	T [ $^\circ\text{C}$ ]	$E_1$ [V]
	100	1.501
	125	1.531
	150	1.545

Rješenje:

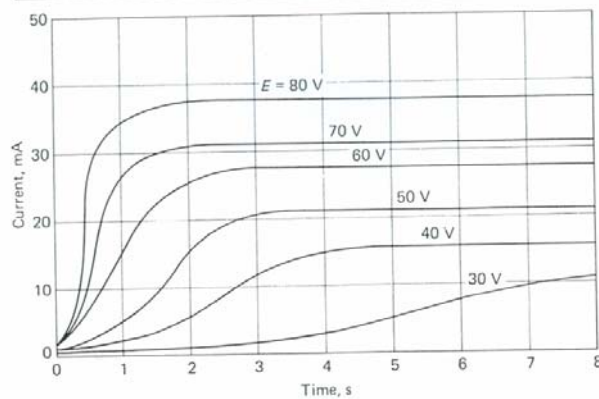
Odredi  $R_T$ :  $R_T = R_1 (E_i/E_1 - 1)$

Odredi  $\beta$ :  $\ln(R_T/R_0) = \beta (1/T - 1/T_0)$

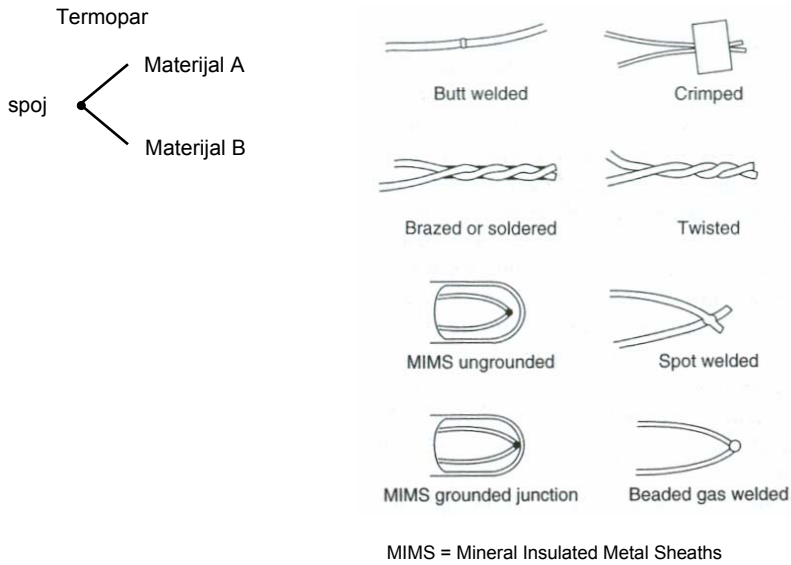
Rezultati

T [ $^\circ\text{C}$ ]	$E_1$ [V]	$R_T$ [ $\Omega$ ]	$\beta$ [K]
100	1,501	5477,4	3546,7
125	1,531	2812,9	3629,9
150	1,545	1604,9	3650,2

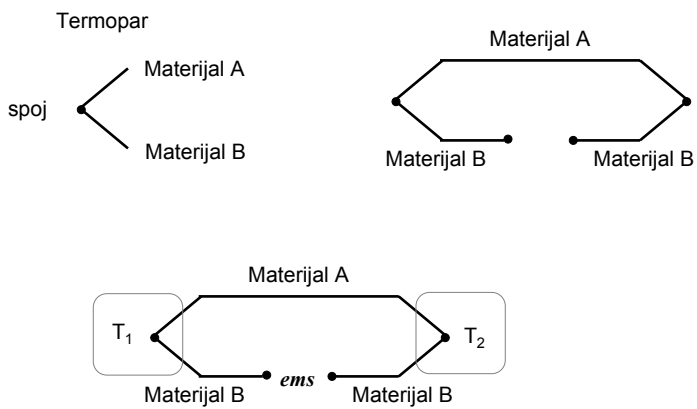
Figure 16.8 Typical current-time relations for thermistors



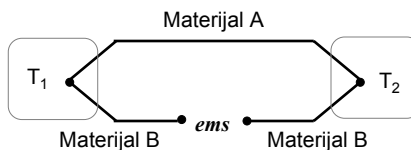
## Termoelektrično mjerenje temperature



## Termoelektrično mjerenje temperature



## Termoelektrični efekti



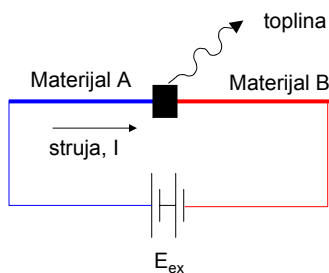
**Seebeck efekt** – razlika temperatura između dva termopara rezultira u elektromotornoj sili – naponu. Ovaj napon se može izmjeriti i kad nema struje u strujnom krugu (otvoreni krug). Za svaki par materijala postoji određena, fiksna i ponovljiva veza između napona i temperature:

$$\alpha_{AB} = \left[ \frac{\partial E}{\partial T} \right]_{ok}$$

$\alpha_{AB}$  = Seebeck coefficient

Mjerenja temperature se baziraju na Seebeckovom termoelektričnom efektu.

## Termoelektrični efekti

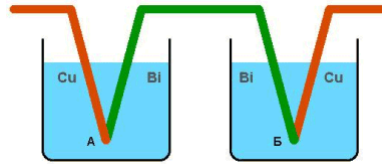


**Peltier efekt** – Prolaz elektricne struje kroz spoj dva različita materijala rezultira u toplini koja se mora dovesti ili odvesti ovisno o smjeru struje. Količina topline je:

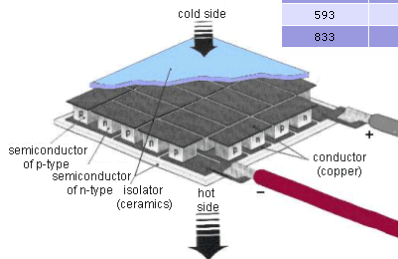
$$Q_{\pi} = \pi_{AB} I$$

$\pi_{AB}$  = Peltierov koeficijent

## Peltier efekt



Peltier factors for different metal pairs					
Fe-constantan		Cu-Ni		Pb-constantan	
$T_r$ , K	$P_r$ , mV	$T_r$ , K	$P_r$ , mV	$T_r$ , K	$P_r$ , mV
273	13,0	292	8,0	293	8,7
299	15,0	328	9,0	383	11,8
403	19,0	478	10,3	508	16,0
513	26,0	563	8,6	578	18,7
593	34,0	613	8,0	633	20,6
833	52,0	718	10,0	713	23,4

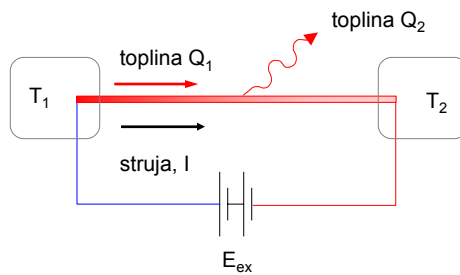


Usually, a Peltier factor is calculated this way:

$$P = \alpha \cdot T$$

$P$  - Peltier factor,  $\alpha$  - Thomson factor,  $T$  - absolute temperature.

## Termoelektrični efekti



**Thomsonov efekt** – u vodiču kroz kojega protiče električna struja, a koji je izložen temperaturnom gradijentu stvara se dodatna toplina (osim one uslijed električnog otpora,  $I^2R$ ):

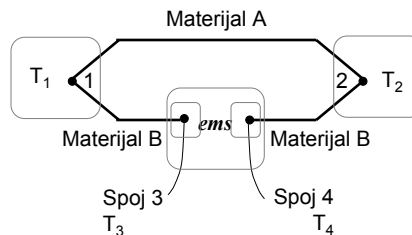
$$Q_\sigma = \sigma I(T_1 - T_2)$$

$\sigma$  = Thomsonov koeficijent

## Osnovni zakoni termo-parova

**Zakon homogenih materijala** – termoelektrična struja se ne može pojaviti u strujnom krugu koji se sastoji od samo jednog homogenog materijala primjenom samo topline bez obzira na varijacije poprečnog presjeka. Drugim riječima za termoelektrični efekt potrebna su dva materijala.

**Zakon sukcesivnih materijala** – Algebarska suma termoelektričnih napona u strujnom krugu koji se sastoji od bilo kojeg broja različitih materijala je jednaka nuli ako je cijeli strujni krug na istoj temperaturi.



Dok god je  $T_3 = T_4$  napon ovog strujnog kruga odgovara razlici temperatura  $T_1$  i  $T_2$

## Osnovni zakoni termo-parova

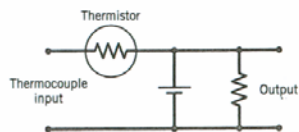
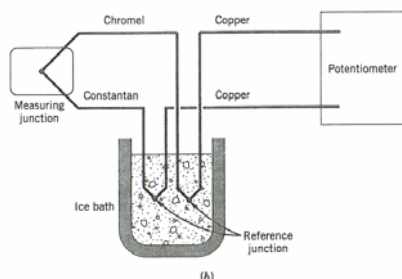
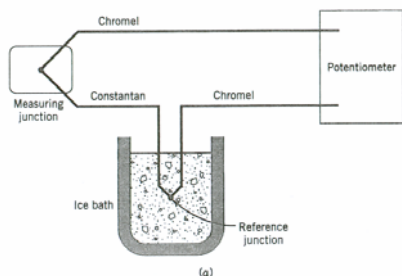
**Zakon homogenih materijala** – termoelektrična struja se ne može pojaviti u strujnom krugu koji se sastoji od samo jednog homogenog materijala primjenom samo topline bez obzira na varijacije poprečnog presjeka. Drugim riječima za termoelektrični efekt potrebna su dva materijala.

**Zakon sukcesivnih materijala** – Algebarska suma termoelektričnih napona u strujnom krugu koji se sastoji od bilo kojeg broja različitih materijala je jednaka nuli ako je cijeli strujni krug na istoj temperaturi.

**Zakon sukcesivnih temperatura** – Ako dva različita homogena materijala stvore napon  $E_1$  kad su im spojevi pri temperaturama  $T_1$  i  $T_2$  i stvore napon  $E_2$  kad su im spojevi pri temperaturama  $T_2$  i  $T_3$  onda je rezultirajući napon kad su im spojevi pri temperaturama  $T_1$  i  $T_3$  jednak  $E_1 + E_2$

Ovaj zakon dozvoljava korištenje termopara kalibriranog na jednoj temperaturi na nekoj drugoj temperaturi (naravno uz odgovarajuću korekciju).

## Osnove mjerenja s termo-parovima

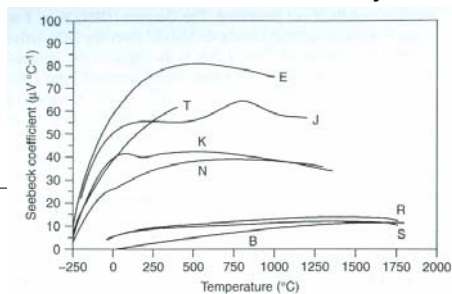


## Tablica oznaka termoparova

Tip	Materijal
B	platina 30% rodij / platina 6% rodij
E	kromel / konstantan
J	željezo / konstantan
K	kromel / alumel
N	Nikal-krom / nikal-silicij
R	platina 13% rodij / platina
S	platina 10% rodij / platina
T	bakar / konstantan

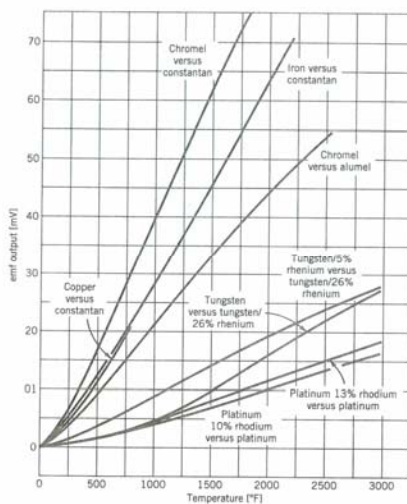
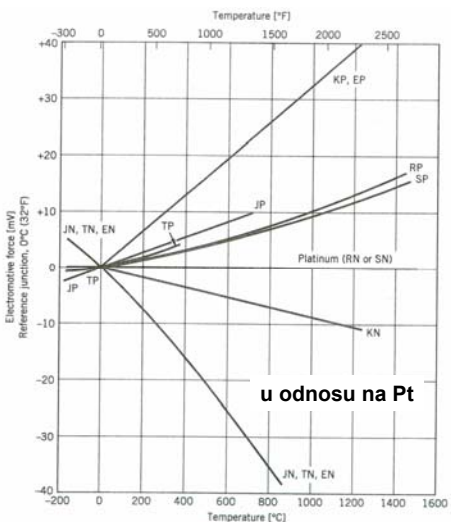
Konstantan: 55% bakar i 45% nikal  
 Kromel: (90% nikal i 10% krom)  
 Alumel: 95% Ni, 2% Al, 2% Mn, 1% Si  
 Nikal-krom: 84.4% Ni, 14.2% Cr, 1.4% Si (Nicrosil)  
 Nikal-silicij: 95.5% Ni, 4.4% Si, 0.15% Mg (Nisil)

### Seebeckov koeficijent





## Ovisnost termoelektrične elektromotorne sile o temperaturi za različite termoparove



referentna temperatura 0 °C

## Primjena pojedinih termoparova

Tip	Materijal	Primjena
E	kromel (+) / konstantan (-)	velika osjetljivost (<1000 °C)
J	željezo / konstantan	neoksidirajuća sredina (<760 °C)
K	kromel / alumel	visoke temperature (<1372 °C)
S	platina 10% rodij / platina	dugotrajna stabilnost visoke temperature (<1768 °C)
T	bakar / konstantan	reducirajuća sredina ili vakum (<400 °C)

**Table 8.6 Thermocouple Reference Table for Type-J Thermocouple\***

Temperature (°C)	Thermocouple emf (mV)								
0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9
-210	-8.095								
-200	-7.890	-7.912	-7.934	-7.955	-7.976	-7.996	-8.017	-8.037	-8.057
-190	-7.659	-7.683	-7.707	-7.731	-7.755	-7.778	-7.801	-7.824	-7.846
-180	-7.403	-7.429	-7.456	-7.482	-7.508	-7.534	-7.559	-7.585	-7.610
-170	-7.123	-7.152	-7.181	-7.209	-7.237	-7.265	-7.293	-7.321	-7.348
-160	-6.821	-6.853	-6.883	-6.914	-6.944	-6.975	-7.005	-7.035	-7.064
-150	-6.500	-6.533	-6.566	-6.598	-6.631	-6.663	-6.695	-6.727	-6.759
-140	-6.159	-6.194	-6.229	-6.263	-6.298	-6.332	-6.366	-6.400	-6.433
-130	-5.801	-5.838	-5.874	-5.910	-5.946	-5.982	-6.018	-6.054	-6.089
-120	-5.426	-5.465	-5.503	-5.541	-5.578	-5.616	-5.653	-5.690	-5.727
-110	-5.037	-5.076	-5.116	-5.155	-5.194	-5.233	-5.272	-5.311	-5.350
-100	-4.633	-4.674	-4.714	-4.755	-4.796	-4.836	-4.877	-4.917	-4.957
-90	-4.215	-4.257	-4.300	-4.342	-4.384	-4.425	-4.467	-4.509	-4.550
-80	-3.786	-3.829	-3.872	-3.916	-3.959	-4.002	-4.045	-4.088	-4.130
-70	-3.344	-3.389	-3.434	-3.478	-3.522	-3.566	-3.610	-3.654	-3.698
-60	-2.893	-2.938	-2.984	-3.029	-3.075	-3.120	-3.165	-3.210	-3.255
-50	-2.431	-2.478	-2.524	-2.571	-2.617	-2.663	-2.709	-2.755	-2.801
-40	-1.961	-2.008	-2.055	-2.103	-2.150	-2.197	-2.244	-2.291	-2.338
-30	-1.482	-1.530	-1.578	-1.626	-1.674	-1.722	-1.770	-1.818	-1.865
-20	-0.995	-1.044	-1.093	-1.142	-1.190	-1.239	-1.288	-1.336	-1.385
-10	-0.501	-0.550	-0.600	-0.650	-0.699	-0.749	-0.798	-0.847	-0.896
0	0.000	-0.050	-0.101	-0.151	-0.201	-0.251	-0.301	-0.351	-0.401
0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8	+9
0	0.000	0.050	0.101	0.151	0.202	0.253	0.303	0.354	0.405
10	0.507	0.558	0.609	0.660	0.711	0.762	0.814	0.865	0.916
20	1.019	1.071	1.122	1.174	1.226	1.277	1.329	1.381	1.433
30	1.537	1.589	1.641	1.693	1.745	1.797	1.849	1.902	1.954
40	2.059	2.111	2.164	2.216	2.269	2.322	2.374	2.427	2.480
50	2.585	2.638	2.691	2.744	2.797	2.850	2.903	2.956	3.009
60	3.116	3.169	3.222	3.275	3.328	3.382	3.436	3.489	3.543
70	3.650	3.703	3.757	3.810	3.864	3.918	3.971	4.025	4.079
80	4.187	4.240	4.294	4.348	4.402	4.456	4.510	4.564	4.618
90	4.726	4.781	4.835	4.889	4.943	4.997	5.052	5.106	5.160
100	5.269	5.323	5.378	5.432	5.487	5.541	5.595	5.650	5.705
110	5.814	5.868	5.923	5.977	6.032	6.087	6.141	6.196	6.251
120	6.360	6.415	6.470	6.525	6.579	6.634	6.689	6.744	6.799
130	6.909	6.964	7.019	7.074	7.129	7.184	7.239	7.294	7.349
140	7.459	7.514	7.569	7.624	7.679	7.734	7.789	7.844	7.900
150	8.010	8.065	8.120	8.175	8.231	8.286	8.341	8.396	8.452
160	8.562	8.618	8.673	8.728	8.783	8.839	8.894	8.949	9.005
170	9.115	9.171	9.226	9.282	9.337	9.392	9.448	9.503	9.559
180	9.669	9.725	9.780	9.836	9.891	9.947	10.002	10.057	10.113
190	10.224	10.279	10.335	10.390	10.446	10.501	10.557	10.612	10.668
200	10.779	10.834	10.890	10.945	11.001	11.056	11.112	11.167	11.223
210	11.334	11.389	11.445	11.501	11.556	11.612	11.667	11.723	11.778
220	11.889	11.945	12.000	12.056	12.111	12.167	12.222	12.278	12.334
230	12.445	12.500	12.556	12.611	12.667	12.722	12.778	12.833	12.889
240	13.000	13.056	13.111	13.167	13.222	13.278	13.333	13.389	13.444
250	13.555	13.611	13.666	13.722	13.777	13.833	13.888	13.944	13.999
260	14.110	14.166	14.221	14.277	14.332	14.388	14.443	14.499	14.554
270	14.665	14.720	14.776	14.831	14.887	14.942	14.998	15.053	15.109

**Table 8.6 (Continued)**

Temperature (°C)	Thermocouple emf (mV)								
0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8	+9
280	15.219	15.275	15.330	15.386	15.441	15.496	15.552	15.607	15.663
290	15.773	15.829	15.884	15.940	15.995	16.050	16.106	16.161	16.216
300	16.327	16.383	16.438	16.493	16.549	16.604	16.659	16.715	16.770
310	16.882	16.936	16.991	17.046	17.102	17.157	17.212	17.268	17.323
320	17.434	17.489	17.544	17.599	17.655	17.710	17.765	17.820	17.876
330	17.986	18.041	18.097	18.152	18.207	18.262	18.318	18.373	18.428
340	18.538	18.594	18.649	18.704	18.759	18.814	18.870	18.925	18.980
350	19.090	19.146	19.201	19.256	19.311	19.366	19.422	19.477	19.532
360	19.642	19.697	19.753	19.808	19.863	19.918	19.973	20.028	20.083
370	20.194	20.249	20.304	20.359	20.414	20.469	20.525	20.580	20.635
380	20.745	20.800	20.855	20.910	20.966	21.021	21.076	21.131	21.186
390	21.297	21.352	21.407	21.462	21.517	21.572	21.627	21.682	21.737
400	21.848	21.903	21.958	22.014	22.069	22.124	22.179	22.234	22.289
410	22.400	22.455	22.510	22.565	22.620	22.676	22.731	22.786	22.841
420	22.952	23.007	23.062	23.117	23.172	23.228	23.283	23.338	23.393
430	23.504	23.559	23.614	23.670	23.725	23.780	23.835	23.891	23.946
440	24.057	24.112	24.167	24.223	24.278	24.333	24.389	24.444	24.500
450	24.610	24.665	24.721	24.776	24.832	24.887	24.943	24.998	25.053
460	25.164	25.220	25.275	25.331	25.386	25.442	25.497	25.553	25.608
470	25.720	25.775	25.831	25.886	25.942	25.998	26.053	26.109	26.165
480	26.276	26.332	26.387	26.443	26.499	26.555	26.610	26.666	26.722
490	26.834	26.889	26.945	27.001	27.057	27.113	27.169	27.225	27.281
500	27.393	27.449	27.505	27.561	27.617	27.673	27.729	27.785	27.841
510	27.953	28.010	28.066	28.122	28.178	28.234	28.291	28.347	28.403
520	28.516	28.572	28.629	28.685	28.741	28.798	28.854	28.911	28.967
530	29.080	29.137	29.194	29.250	29.307	29.363	29.420	29.477	29.534
540	29.647	29.704	29.761	29.818	29.874	29.931	29.988	30.045	30.102
550	30.216	30.273	30.330	30.387	30.444	30.502	30.559	30.616	30.673
560	30.788	30.845	30.902	30.960	31.017	31.074	31.132	31.189	31.247
570	31.362	31.419	31.477	31.535	31.592	31.650	31.708	31.765	31.823
580	31.939	31.997	32.055	32.113	32.171	32.229	32.287	32.345	32.403
590	32.519	32.577	32.636	32.694	32.752	32.810	32.869	32.927	32.985
600	33.162	33.221	33.279	33.337	33.395	33.454	33.513	33.571	33.630
610	33.689	33.748	33.807	33.866	33.925	33.984	34.043	34.102	34.161
620	34.279	34.338	34.397	34.457	34.516	34.575	34.635	34.694	34.754
630	34.873	34.932	34.992	35.051	35.111	35.171	35.230	35.290	35.350
640	35.470	35.530	35.590	35.650	35.710	35.770	35.830	35.890	35.950
650	36.071	36.131	36.191	36.252	36.312	36.373	36.433	36.494	36.554
660	36.675	36.736	36.797	36.858	36.919	36.979	37.040	37.101	37.162
670	37.284	37.345	37.406	37.467	37.528	37.590	37.651	37.712	37.773
680	37.896	37.958	38.019	38.081	38.142	38.204	38.265	38.327	38.389
690	38.512	38.574	38.636	38.698	38.760	38.822	38.884	38.946	39.008
700	39.132	39.194	39.256	39.318	39.381	39.443	39.505	39.568	39.630
710	39.755	39.818	39.880	39.943	40.006	40.068	40.131	40.193	40.256
720	40.382	40.445	40.508	40.570	40.633	40.696	40.759	40.822	40.886
730	41.012	41.075	41.138	41.201	41.265	41.328	41.391	41.455	41.518
740	41.645	41.708	41.772	41.835	41.899	41.962	42.026	42.090	42.153
750	42.281	42.344	42.408	42.472	42.536	42.599	42.663	42.727	42.791
760	42.919	42.983	43.047	43.110	43.174	43.238	43.303	43.367	43.431

\*Reference junction at 0°C.

**Table 8.7 Reference Functions for Selected Letter Designated Thermocouples**

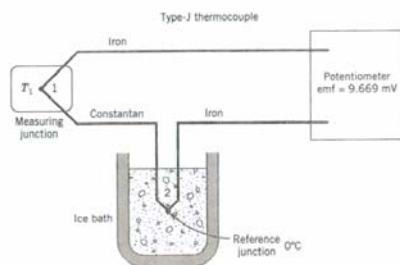
The relationship between emf and temperature is provided in the form of a polynomial in temperature [10]

$$E = \sum_{i=0}^n c_i T^i$$

where  $E$  is in mV and  $T$  is in °C. Constants are provided below.

Thermocouple Type	Temperature Range	Constants
J-type	-210~760°C	$c_0 = 0.000\ 000\ 000\ 0$
		$c_1 = 5.038\ 118\ 781\ 5 \times 10^1$
		$c_2 = 3.047\ 583\ 693\ 0 \times 10^{-2}$
		$c_3 = -8.568\ 106\ 572\ 0 \times 10^{-5}$
		$c_4 = 1.322\ 819\ 529\ 5 \times 10^{-7}$
		$c_5 = -1.705\ 295\ 833\ 7 \times 10^{-10}$
		$c_6 = 2.094\ 809\ 069\ 7 \times 10^{-13}$
		$c_7 = -1.253\ 839\ 533\ 6 \times 10^{-16}$
		$c_8 = 1.563\ 172\ 569\ 7 \times 10^{-20}$
		$c_9 = 0.000\ 000\ 000\ 0$
		$c_{10} = 3.874\ 810\ 636\ 4 \times 10^1$
		$c_{11} = 4.419\ 443\ 434\ 7 \times 10^{-2}$
		$c_{12} = 1.184\ 432\ 310\ 5 \times 10^{-4}$
		$c_{13} = 2.003\ 297\ 355\ 4 \times 10^{-5}$
$c_{14} = 9.013\ 801\ 955\ 9 \times 10^{-7}$		
T-type	-270~0°C	$c_0 = 0.000\ 000\ 000\ 0$
		$c_1 = 3.874\ 810\ 636\ 4 \times 10^1$
		$c_2 = 4.419\ 443\ 434\ 7 \times 10^{-2}$
		$c_3 = 1.184\ 432\ 310\ 5 \times 10^{-4}$
		$c_4 = 2.003\ 297\ 355\ 4 \times 10^{-5}$
		$c_5 = 9.013\ 801\ 955\ 9 \times 10^{-7}$
		$c_6 = 2.265\ 115\ 659\ 3 \times 10^{-8}$
		$c_7 = 3.607\ 115\ 420\ 5 \times 10^{-10}$
		$c_$

Primjer 1

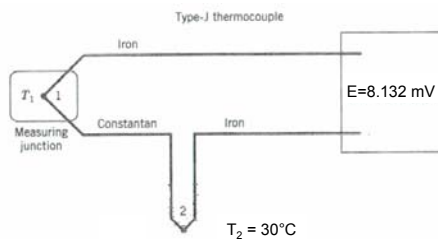


Zadano:  $T_2 = 0$   
 $E = 9.669\text{ mV}$

Zadatak:  $T_1 = ?$

Rješenje: iz Tablice  $T_1 = \underline{180^\circ\text{C}}$

Primjer 2



Zadano:  $T_2 = 30^\circ\text{C}$   
 $E = 8.132\text{ mV}$

Zadatak:  $T_1 = ?$

Rješenje:

$$E_{0-30} + E_{30-T_1} = E_{0-T_1}$$

iz Tablice  $1.537 + 8.132 = 9.669\text{ mV}$

iz Tablice  $T_1 = \underline{180^\circ\text{C}}$

### Primjer 3

J-tip termopar, mjeri temperaturu od 100 °C (referentna temperatura je 0 °C).  
Dužina žice termopara je 3 m. Otpor žice je 18.5 Ω/m. Rezolucija potencijometra kojim se vrši mjerenje je 0.005 mV.  
Izračunaj preostalu struju u krugu u ravnotežnom stanju.

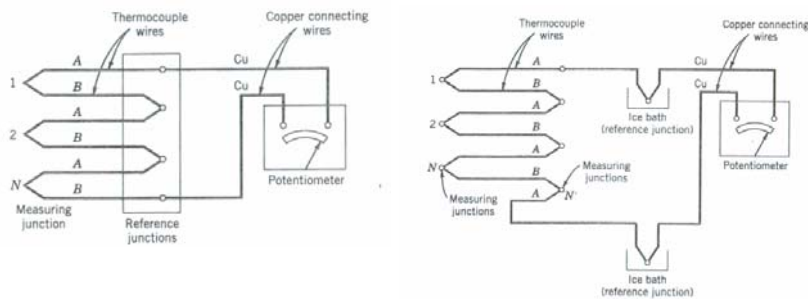
$$R = 18.5 \times 3 = 55.5 \Omega$$

$$I = E / R = 0.005 \text{ mV} / 55.5 \Omega = 9 \times 10^{-8} \text{ A}$$

$$\text{Iz tablice za } T=100 \text{ °C } E = 5,269 \text{ mV} \quad = 5,269 / 100 = 0.05269 \text{ mV/°C}$$

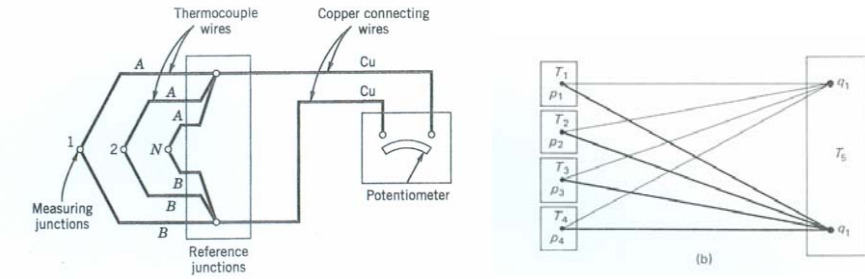
$$\text{Griješka uslijed ove struje je:} \quad = 0.005 \text{ mV} / 0.05269 \text{ mV/°C} = 0.1 \text{ °C}$$

### Termoskupina – serijsko spajanje termoparova



Mjerenje prosječne temperature, ili pojačanje napona (signala)

## Paralelno spajanje termoparova



Mjerenje prosječne temperature

## Griješke pri mjerenju s termoparovima

1. Termalne pogriješke
  1. Griješke uronjenja
  2. Vremenska konstanta
  3. Utjecaj radijacije
2. Nehomogenost materijala
  1. Ostecenja
  2. Oksidacija i kemijski utjecaj
  3. Visoke temperature
3. Pogresna referentna temperatura
4. Interferencija
5. Otpor u zicama
6. Griješke linearizacije

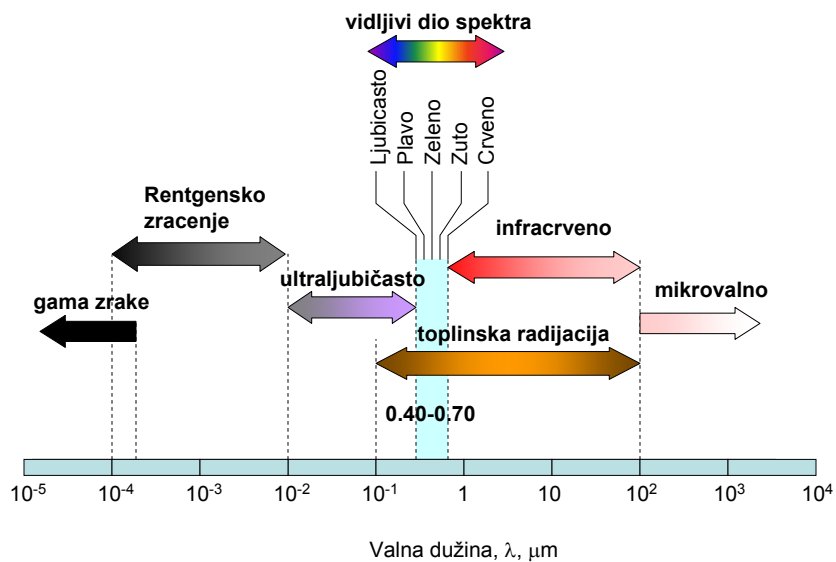
## Mjerenje temperature detekcijom toplinskog zračenja

pirometrija

-Nema potrebe za direktnim kontaktom (samo vizuelni kontakt je dovoljan)

Sva tijela s temperaturom većom od apsolutne 0 zrače energiju

## Spektar zračenja



Toplinska radijacija koju emitira neko tijelo je proporcionalna temperaturi tijela na četvrtu potenciju. U idealnom slučaju:

$$E_b = \sigma T^4$$

$E_b$  = radijacija crnog tijela

$\sigma$  = Stefan-Boltzman konstanta  $5,6705 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

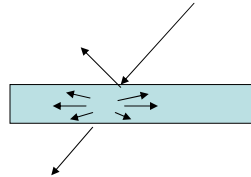
$\alpha$  = absorptivnost

$\rho$  = reflektivnost

$\tau$  = transmitivnost

$$\varepsilon = \alpha$$

$\varepsilon$  = emisivitet



Radijativna izmjena topline između dva idealna (crna) tijela:

$$q = \sigma (T_A^4 - T_B^4)$$

U slučaju kad neidealno tijelo A emitira energiju prema idealnom tijelu B

$$q = \varepsilon_A F_{AB} \sigma (T_A^4 - T_B^4)$$

$q$  = radijativni tijek topline s A na B,  $\text{W/m}^2$

$\varepsilon_A$  = emisivnost tijela A

$F_{AB}$  = faktor konfiguracije (ovisno o poziciji tijela A i B)

$T_A$  i  $T_B$  = apsolutne temperature tijela A i B

$$E_{b\lambda} = \frac{2\pi h_p c^2}{\lambda^5 [\exp(h_p c / k_B \lambda T) - 1]}$$

$E_{b\lambda}$  = energija emitirana pri valnoj duzini  $\lambda$

$\lambda$  = valna duzina

$c$  = brzina svjetlosti

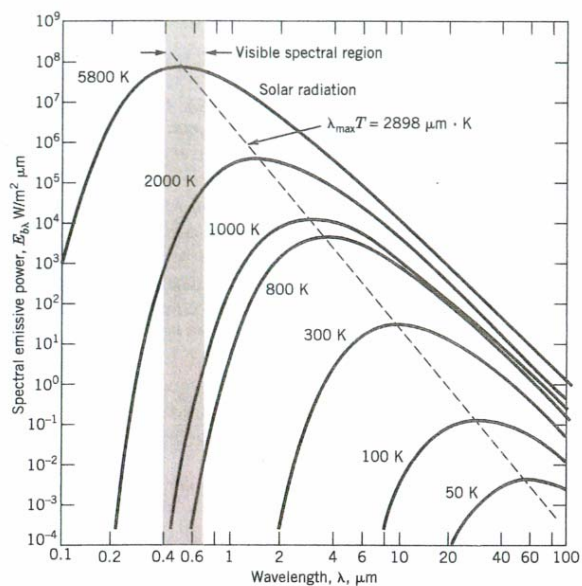
$h_p$  = Planckova konstanta =  $6.6256 \times 10^{-34}$  J s

$k_B$  = Boltzmannova konstanta =  $1.3805 \times 10^{-23}$  J/K

$$E_{b\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2 / \lambda T) - 1]}$$

$$C_1 = 374.18 \text{ MW } \mu\text{m}^4 / \text{m}^2$$

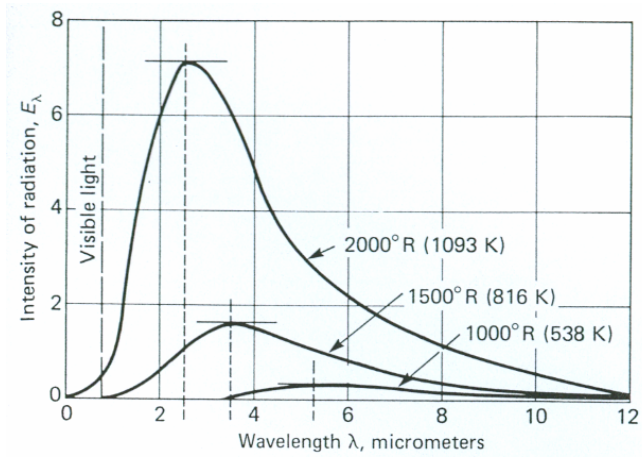
$$C_2 = 14388 \text{ } \mu\text{mK}$$



Planckova distribucija emisivne snage crnog tijela u funkciji valne duzine zracenja

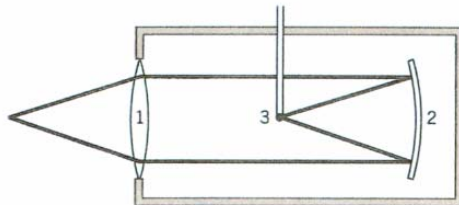


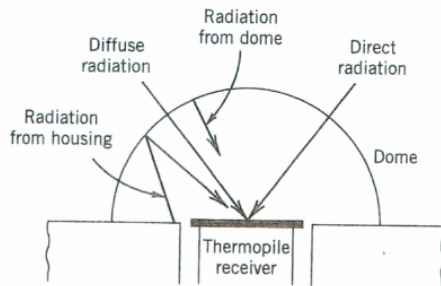
Wienov zakon:  $\lambda_{\max} T = 2897.8 \mu\text{mK}$



#### Detekcija toplinske radijacije

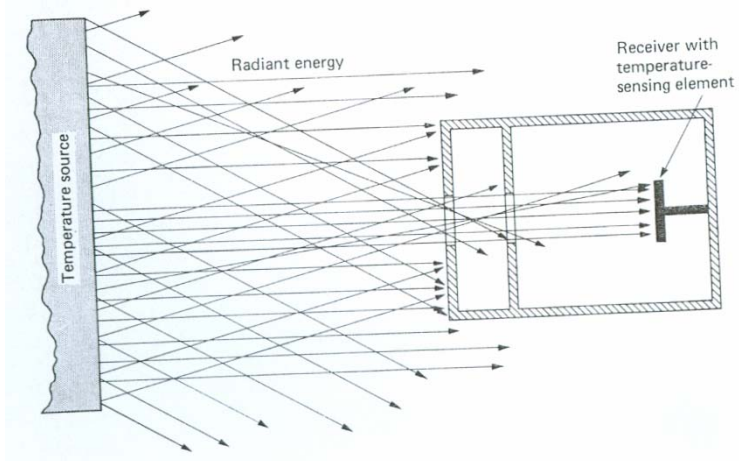
- 1) Termalni detektor (vidi sliku) koji mjeri temperaturu (u tocki 3)
- 2) Fotonaponski detektor



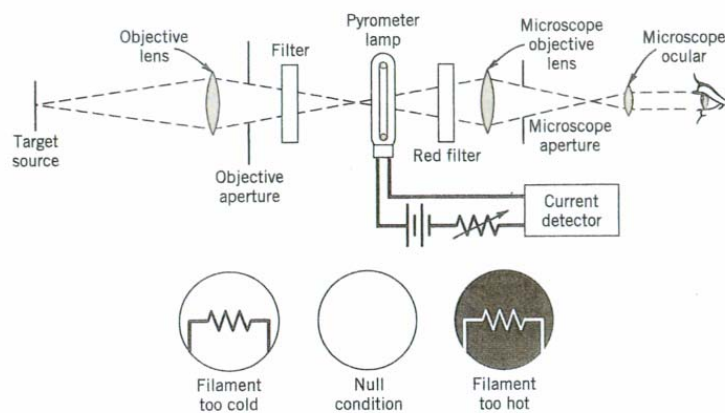


Napon koji rezultira u termoskupini je indikacija temperature tijela koje emitira radijaciju  
 Koristi se za mjerenje suncevog zracenja

### Mjerenje totalne radijacije



## Opticki pirometar



Appearance of lamp filament in eyepiece of optical pyrometer.

**Figure 8.28** Schematic diagram of a disappearing filament optical pyrometer.