

PRETVORNICI ZA MJERENJE TEMPERATURE:

KONTAKTNI (vođenje topline)

- otpornički elementi
- termistori
- termopar
- poluvodički pn-spoj

BESKONTAKTNI (toplinsko zračenje)

- infracrveni termometar
- piroelektrički termometar

KONTAKTNI TEMPERATURNI PRETVORNICI:

SVOJSTVO	POLUVODIČKI	TERMOPAR	Pt-OTPORNIČKI	TERMISTOR
TEMP. PODRUČJE	-50 do +180 °C	-270 do +3500 °C	-260 do +850 °C	-80 do +180 °C (+350 °C)
TOČNOST MJERNJA APSOLUTNE TEMPERATURE	SREDNJA	PROBLEMATIČNA ZBOG REFERENTNOG SPOJA	VISOKA, U ŠIROKOM PODRUČJU	VISOKA U USKOM PODRUČJU
TOČNOST MJERENJA MALIH TEMP. RAZLIKA	SREDNJA	VISOKA	SREDNJA	SREDNJA
POGODAN ZA INTEGRACIJU NA Si-CHIP	DA	DA	NE U STANDARDNOM PROCESU	NE U STANDARDNOM PROCESU
OSJETLJIVOST	VISOKA (2mV/K)	NISKA (0.05 - 1 mV/K)	NISKA (0.4%/K)	VISOKA (5%/K)
LINEARNOST	DOBRA	DOBRA	DOBRA	VRLO NELINEARNI
REPREZENTANT TEMPERATURE	NAPON	NAPON	OTPOR	OTPOR

OTPORNIČKI ELEMENTI (engl. Resistive Temperature Detector – RTD):

Promjena otpora s temperaturom:

npr. za Pt-100 otpornički element u području od -200°C do 0°C vrijedi

$$R(T) = R_0 [1 + AT + BT^2 + C(T - 100^\circ\text{C})T^3]$$

a u području od 0°C do 850°C

$$R(T) = R_0 [1 + AT + BT^2]$$

pri čemu je

$$R(T) \text{ otpor na temperaturi } T$$

$$R_0 \text{ otpor na temperaturi } T = 0^\circ\text{C}$$

te konstante

$$A = 3.9083 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$B = -5.775 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$$

$$C = -4.183 \times 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$$

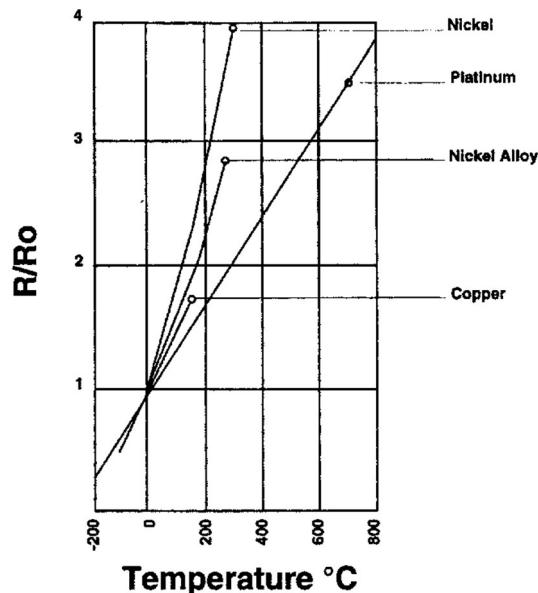


FIGURE 32.7 Of the common metals, nickel has the highest sensitivity.

USPOREDBA NAJČEŠĆIH OTPORNIČKIH ELEMENATA:

MATERIJAL	TEMPERATURNO PODRUČJE	TEMP. KOEFICIJENT $\alpha [\Omega/\Omega^\circ\text{C}]$	OTPOR PRI 0°C $R_0 [\Omega]$
PLATINA (Pt)	-200 do +850 °C	0.003851	25, 50 100, 200, 500, 1000, 2000
NIKAL (Ni)	-80 do +320 °C	0.00672	50, 100, 120
BAKAR (Cu)	-200 do +260 °C	0.00427	10 Ω pri 20°C

Najčešće se koristi platina zbog svoje izvanredne stabilnosti, pa se u engleskom jeziku pojavljuje i naziv **Platinum Resistance Thermometer (PRT)**.

Koristi se pojednostavljeni linearni model, nelinearnost se opisuje tablično:

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

$$R_0 = 100 \Omega, \text{ otpor pri } 0^\circ\text{C}$$

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100^\circ\text{C} \cdot R_0} \left[\frac{\Omega}{\Omega^\circ\text{C}} \right], \text{ temperaturni koeficijent}$$

Svi otpornički elementi imaju pozitivni temperaturni koeficijent.

Norma **IEC 60751:2008 Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors** definira četiri klase termometara izvedenih Pt otporničkim elementima s obzirom na tolerancije temperature:

Tolerance class	Temperature range of validity °C		Tolerance values ^a °C
	Wire wound resistors	Film resistors	
AA	-50 to +250	0 to +150	$\pm (0.1 + 0.0017 t)$
A	-100 to +450	-30 to +300	$\pm (0.15 + 0.002 t)$
B	-196 to +600	-50 to +500	$\pm (0.3 + 0.005 t)$
C	-196 to +600	-50 to +600	$\pm (0.6 + 0.01 t)$

^a $| t |$ = modulus of temperature in °C without regard to sign.

Izvedbe otporničkih elemenata:

Platina je izvrstan vodič ($\rho = 0.11 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$). Da bi izradili otpornik iznosa 100Ω , a da ne potrošimo previše platine (želimo RTD male mase radi manjeg toplinskog kapaciteta; platina je skupa), namatamo ga s vrlo tankom žicom, debljine $7 \div 50 \mu\text{m}$. Zbog tako tanke žice otpornički elementi od platine **osjetljivi su na prekid**. Žica se namata bifilarno, na keramičko tijelo ili u obliku spirale.

Otpornički elementi od platine izrađuju se još i nanošenjem tankog filma platine na keramičku podlogu.

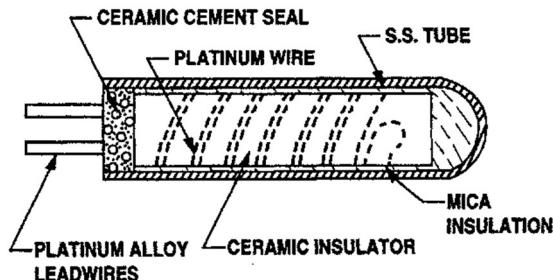


FIGURE 32.11 The wirewound RTD is noninductively wound around a cylindrical ceramic mandrel.

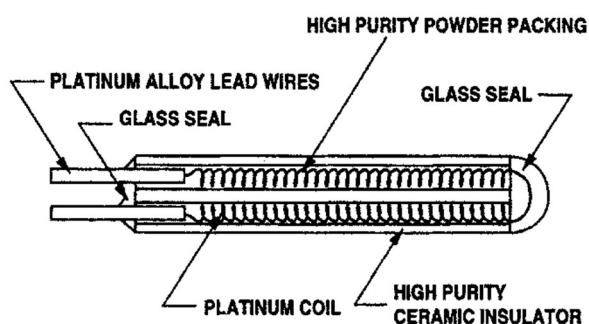


FIGURE 32.12 The coil suspension RTD has a coil of wire assembled into small holes.

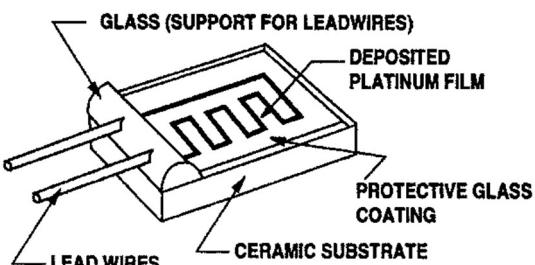


FIGURE 32.13 Thin-film elements have a thin film of platinum deposited onto a ceramic substrate.

Mjerenje otpora RTD-a provodi se spajanjem u granu neuravnoteženog mosta i U-I metodom

Problem samozagrijavanja: zbog protoka struje dolazi do povišenja temperature samog otporničkog elementa. Zbog toga se koriste struje iznosa do 1mA .

$$P = I^2 \cdot R \quad \Delta T = \frac{P[\text{mW}]}{K[\text{mW}/^\circ\text{C}]}$$

Koefficijent samozagrijavanja K navodi se za zrak ili za vodu. Tipično iznosi $4\text{mW}/^\circ\text{C}$. Radi smanjenja problema samozagrijavanja standardni otpornici imaju otpor 0.25 , 2.5 ili 25Ω

Na laboratorijskim vježbama koristit će se otpornički element Ni1000SOT (proizvođač TE Connectivity), napravljen od nikla).

Table 1 – Temperature/resistance relationship, $R_0 = 100.00 \Omega$

$t_{90}/^{\circ}\text{C}$	Resistance at the temperature $t_{90}/^{\circ}\text{C}$ Ω										$t_{90}/^{\circ}\text{C}$
	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	
-200	18.52										-200
-190	22.83	22.40	21.97	21.54	21.11	20.68	20.25	19.82	19.38	18.95	-190
-180	27.10	26.67	26.24	25.82	25.39	24.97	24.54	24.11	23.68	23.25	-180
-170	31.34	30.91	30.49	30.07	29.64	29.22	28.80	28.37	27.95	27.52	-170
-160	35.54	35.12	34.70	34.28	33.86	33.44	33.02	32.60	32.18	31.76	-160
-150	39.72	39.31	38.89	38.47	38.05	37.64	37.22	36.80	36.38	35.96	-150
-140	43.88	43.46	43.05	42.63	42.22	41.80	41.39	40.97	40.56	40.14	-140
-130	48.00	47.59	47.18	46.77	46.36	45.94	45.53	45.12	44.70	44.29	-130
-120	52.11	51.70	51.29	50.88	50.47	50.06	49.65	49.24	48.83	48.42	-120
-110	56.19	55.79	55.38	54.97	54.56	54.15	53.75	53.34	52.93	52.52	-110
-100	60.26	59.85	59.44	59.04	58.63	58.23	57.82	57.41	57.01	56.60	-100
-90	64.30	63.90	63.49	63.09	62.68	62.28	61.88	61.47	61.07	60.66	-90
-80	68.33	67.92	67.52	67.12	66.72	66.31	65.91	65.51	65.11	64.70	-80
-70	72.33	71.93	71.53	71.13	70.73	70.33	69.93	69.53	69.13	68.73	-70
-60	76.33	75.93	75.53	75.13	74.73	74.33	73.93	73.53	73.13	72.73	-60
-50	80.31	79.91	79.51	79.11	78.72	78.32	77.92	77.52	77.12	76.73	-50
-40	84.27	83.87	83.48	83.08	82.69	82.29	81.89	81.50	81.10	80.70	-40
-30	88.22	87.83	87.43	87.04	86.64	86.25	85.85	85.46	85.06	84.67	-30
-20	92.16	91.77	91.37	90.98	90.59	90.19	89.80	89.40	89.01	88.62	-20
-10	96.09	95.69	95.30	94.91	94.52	94.12	93.73	93.34	92.95	92.55	-10
0	100.00	99.61	99.22	98.83	98.44	98.04	97.65	97.26	96.87	96.48	0
$t_{90}/^{\circ}\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$t_{90}/^{\circ}\text{C}$
0	100.00	100.39	100.78	101.17	101.56	101.95	102.34	102.73	103.12	103.51	0
10	103.90	104.29	104.68	105.07	105.46	105.85	106.24	106.63	107.02	107.40	10
20	107.79	108.18	108.57	108.96	109.35	109.73	110.12	110.51	110.90	111.29	20
30	111.67	112.06	112.45	112.83	113.22	113.61	114.00	114.38	114.77	115.15	30
40	115.54	115.93	116.31	116.70	117.08	117.47	117.86	118.24	118.63	119.01	40
50	119.40	119.78	120.17	120.55	120.94	121.32	121.71	122.09	122.47	122.86	50
60	123.24	123.63	124.01	124.39	124.78	125.16	125.54	125.93	126.31	126.69	60
70	127.08	127.46	127.84	128.22	128.61	128.99	129.37	129.75	130.13	130.52	70
80	130.90	131.28	131.66	132.04	132.42	132.80	133.18	133.57	133.95	134.33	80
90	134.71	135.09	135.47	135.85	136.23	136.61	136.99	137.37	137.75	138.13	90
100	138.51	138.88	139.26	139.64	140.02	140.40	140.78	141.16	141.54	141.91	100
110	142.29	142.67	143.05	143.43	143.80	144.18	144.56	144.94	145.31	145.69	110
120	146.07	146.44	146.82	147.20	147.57	147.95	148.33	148.70	149.08	149.46	120
130	149.83	150.21	150.58	150.96	151.33	151.71	152.08	152.46	152.83	153.21	130
140	153.58	153.96	154.33	154.71	155.08	155.46	155.83	156.20	156.58	156.95	140
150	157.33	157.70	158.07	158.45	158.82	159.19	159.56	159.94	160.31	160.68	150
160	161.05	161.43	161.80	162.17	162.54	162.91	163.29	163.66	164.03	164.40	160
170	164.77	165.14	165.51	165.89	166.26	166.63	167.00	167.37	167.74	168.11	170
180	168.48	168.85	169.22	169.59	169.96	170.33	170.70	171.07	171.43	171.80	180
190	172.17	172.54	172.91	173.28	173.65	174.02	174.38	174.75	175.12	175.49	190
200	175.86	176.22	176.59	176.96	177.33	177.69	178.06	178.43	178.79	179.16	200
210	179.53	179.89	180.26	180.63	180.99	181.36	181.72	182.09	182.46	182.82	210
220	183.19	183.55	183.92	184.28	184.65	185.01	185.38	185.74	186.11	186.47	220
230	186.84	187.20	187.56	187.93	188.29	188.66	189.02	189.38	189.75	190.11	230
240	190.47	190.84	191.20	191.56	191.92	192.29	192.65	193.01	193.37	193.74	240
250	194.10	194.46	194.82	195.18	195.55	195.91	196.27	196.63	196.99	197.35	250
260	197.71	198.07	198.43	198.79	199.15	199.51	199.87	200.23	200.59	200.95	260
270	201.31	201.67	202.03	202.39	202.75	203.11	203.47	203.83	204.19	204.55	270
280	204.90	205.26	205.62	205.98	206.34	206.70	207.05	207.41	207.77	208.13	280
290	208.48	208.84	209.20	209.56	209.91	210.27	210.63	210.98	211.34	211.70	290
300	212.05	212.41	212.76	213.12	213.48	213.83	214.19	214.54	214.90	215.25	300
310	215.61	215.96	216.32	216.67	217.03	217.38	217.74	218.09	218.44	218.80	310
320	219.15	219.51	219.86	220.21	220.57	220.92	221.27	221.63	221.98	222.33	320

TERMISTORI (engl. Thermistors):

Imaju za red veličine veći temperaturni koeficijent od otporničkih pretvornika, a može biti negativan (NTC) ili pozitivan (PTC)

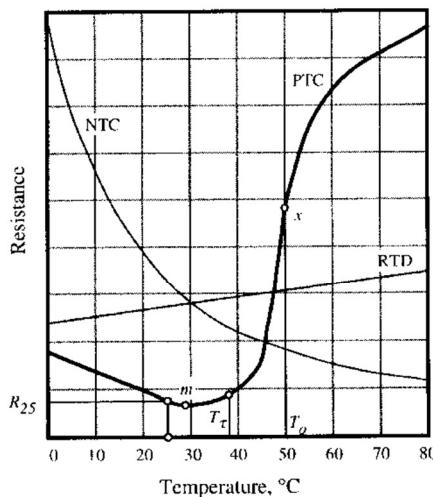


FIGURE 16.10. Transfer functions of PTC and NTC thermistors as compared with RTD.

Norme koje opisuju termistore:

IEC 60539-1:2016 Directly heated negative temperature coefficient thermistors - Part 1: Generic specification

IEC 60738-1:2006+AMD1:2009 CSV Consolidated version Thermistors - Directly heated positive temperature coefficient -Part 1: Generic specification

NTC termistor

Izrađuju se od **metalnih oksida** (Fe_2O_3 , MgCr_2O_4 , ...)

PROMJENA OTPORA S TEMPERATUROM:

Najosjetljiviji temperaturni senzori, nelinearna ovisnost $R(T)$, osjetljivosti i temperaturni koeficijent ovise o temperaturi.

Nelinearna ovisnost $R(T)$ opisuje se različitim funkcijama, najčešće korištena je eksponencijalna aproksimacija.

$$R(T) = Ae^{\frac{B}{T}}$$

gdje su:

- B – konstanta ovisna o materijalu izražava se u kelvinima.
Tipične vrijednosti su od 2000 do 5000K.
- T – temperatura u kelvinima

Osjetljivost i temperaturni koeficijent ovise o temperaturi:

$$\frac{dR}{dT} = A \left(-\frac{B}{T^2} \right) e^{\frac{B}{T}} = R \left(-\frac{B}{T^2} \right)$$

$$\frac{\frac{dR}{dT}}{R} = -\frac{B}{T}$$

tipično iznosi $-4\%/\text{°C}$

Temperaturni koeficijent:

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = -\frac{B}{T^2}$$

Otpor $R(T_1)$ je zadan na nekoj referentnoj temperaturi T_1 (najčešće 25 °C). Iz tog podatka i izmjerenoj otporu na temperaturi T_2 može se odrediti mjerena temperatura.

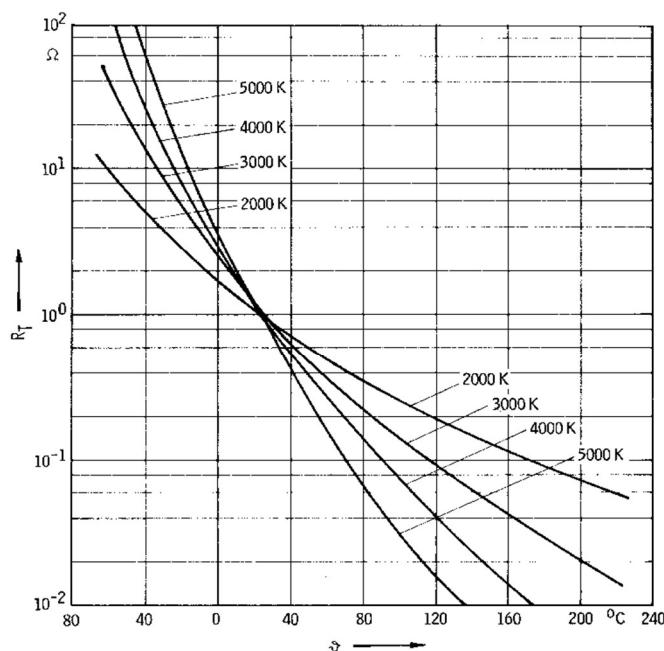
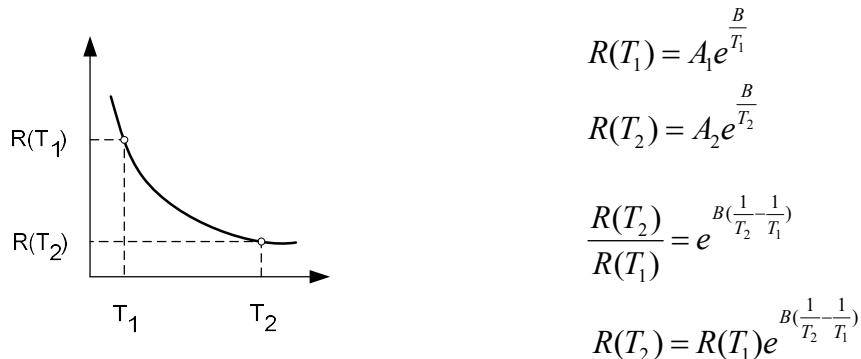


Abb. 2.4.1 Kennlinien für unterschiedliche Halbleiter, die in ihren B-Werten differieren

Problemi:

- Samozagrijavanje NTC-a
- Tolerancije NTC termistora su oko ±10%
(mogu se kupiti termistori s uskim tolerancijama - moguća međusobna zamjena - točnost 0.1 do 0.2 °C u području od 0 do 70 °C)
- Starenje

Otpor na sobnoj temperaturi se kreće od 10 Ω do M Ω

Linearizacija karakteristike:

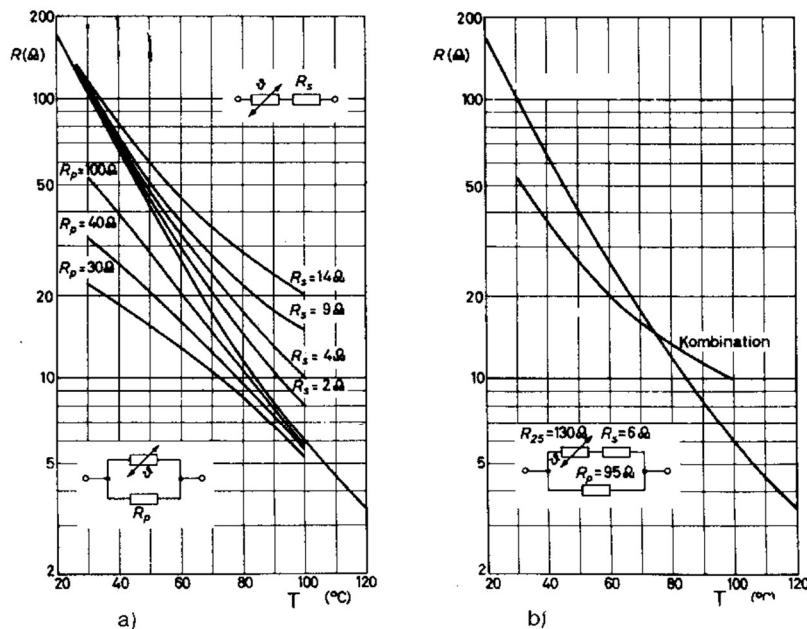


Abb. 2.4.6 Linearisierungsmöglichkeiten für Heißleiter durch Parallel- und Reihenschaltungen

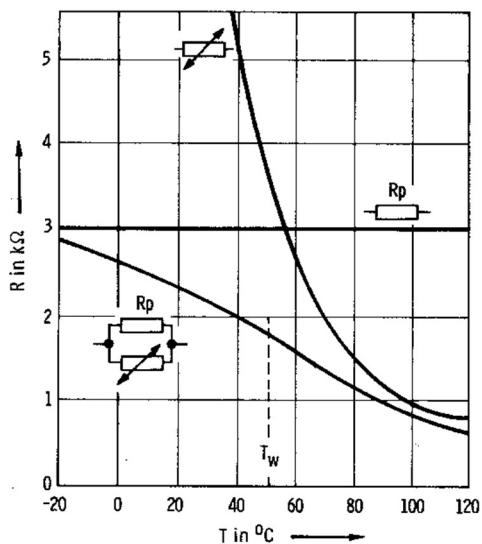


Abb. 2.4.7
Kennlinien eines Heißleiters
und eines Festwiderstandes
(R_p) sowie die Parallelschaltung von beiden

Iz gornje se slike vidi da je karakteristika paralelne kombinacije **linearnija** ali se smanjila **osjetljivost** mjernog pretvornika
Otpor koji dodajemo paralelno NTC-u računamo prema sljedećoj formuli:

$$R_p = N_w \frac{B - 2T_w}{B + 2T_w}$$

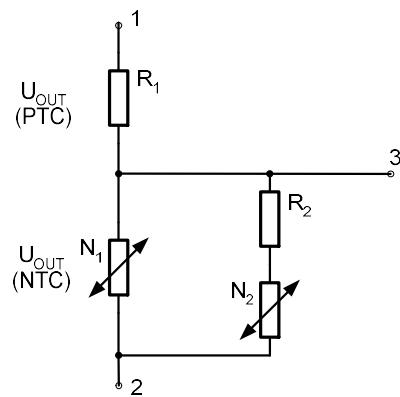
gdje je:

N_w - otpor NTC-a na temperaturi oko koje želimo obaviti linearizaciju

T_w - točka infleksije (područje maksimalne linearnosti)

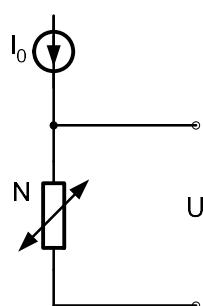
R_p izaberemo tako da točku infleksije T_w postavimo u sredinu željenog mjernog područja.

Linearnost se može poboljšati korištenjem naponskog djelitelja.

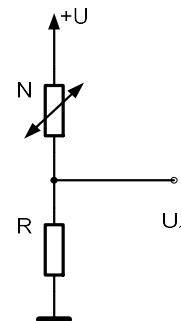


Ova izvedba daje odstupanje od linearosti maksimalno 0.22°C u području od 0 do 100°C . Spajanjem 1 na 2 dobiva se otpornička mreža kojoj se otpor linearno mijenja s temperaturom.

Načini korištenja NTC termistora



Napon U proporcionalan je otporu NTC termistora (nelinearno).



$$U_1 = U \frac{R}{R + N}$$

$$U_1 = U \frac{1}{1 + \frac{N}{R}}$$

Djelomična kompenzacija nelinearnosti NTC-a i naponskog djelitelja

Izvedbe NTC termistora:

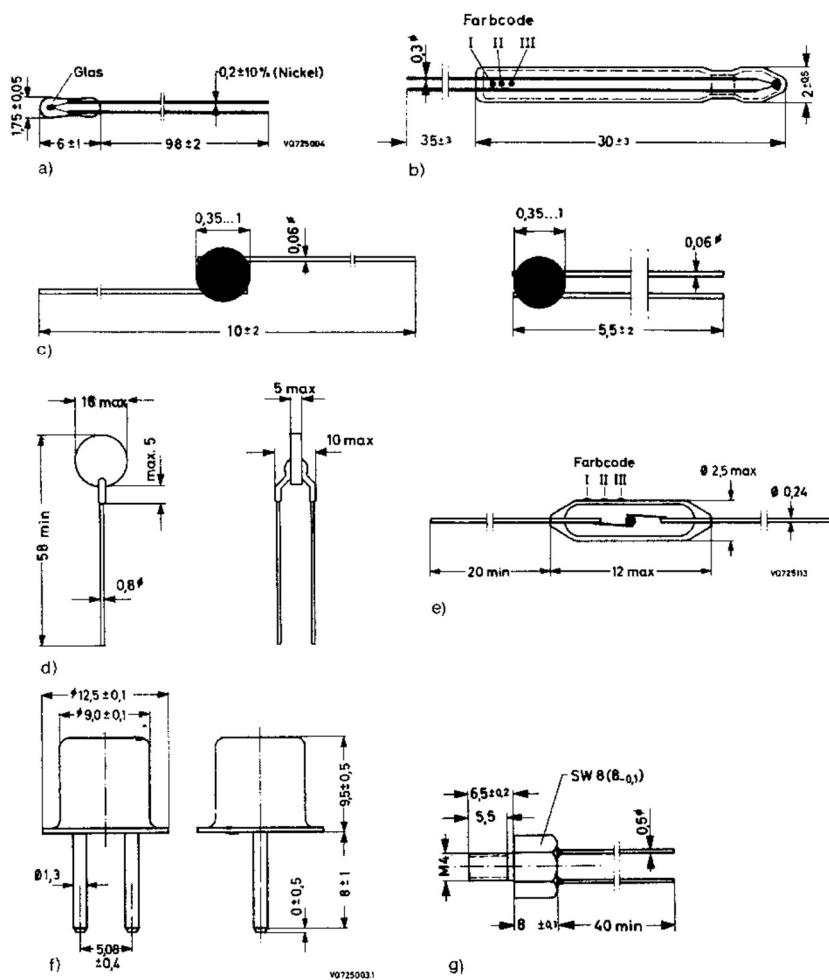


Abb. 2.4.2 Verschiedene Ausführungsformen von Heißleiter-Temperatursensoren, a, b, e) verglaste Ausführungen; c) Miniatur-Heißleiter; d) scheibenförmiger Heißleiter; f, g) gekapselte Ausführungsform

Vremenska konstanta:

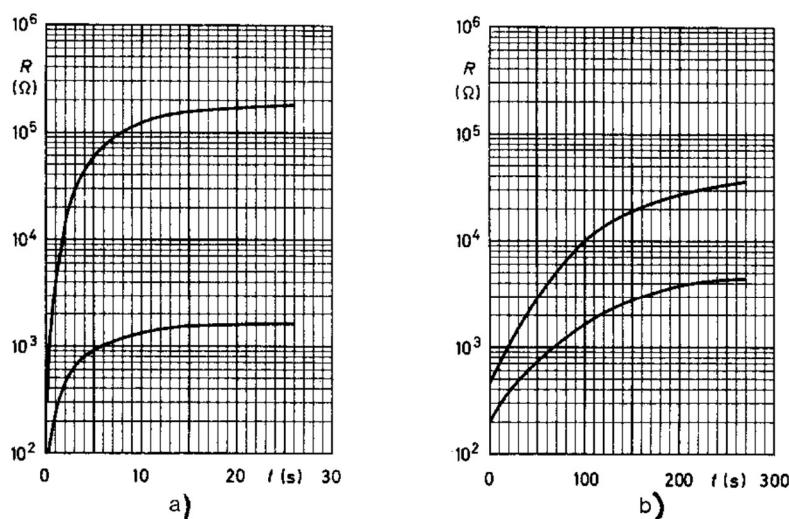


Abb. 2.4.5 Thermische Zeitkonstante für (a) Miniatusensoren und (b) scheibenförmige Heißleiter

U(I) karakteristika:

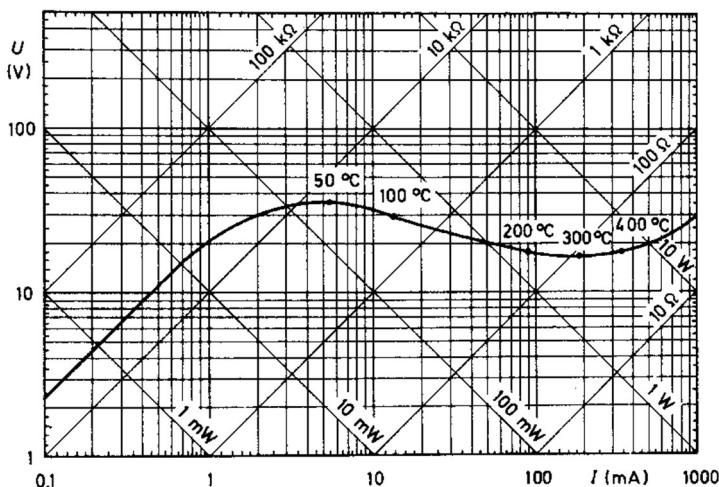


Abb. 2.4.3 Strom-Spannungs-Kennlinie eines Heißleiters

Na gornjoj se slici vidi kako karakteristika zbog samozagrijavanja počinje odstupati od linearne. Povećanjem struje raste i napon do neke granice linearno, dok se ne počne smanjivati otpor uslijed samozagrijavanja (I^2R). Nakon što kod neke određene struje napon postigne maksimum, dalnjim povećanjem struje napon pada.

Kod mjerena s **konstantnom strujom**, povećanjem T smanjuje se R_T , a time i disipirana snaga I^2R_T .

Kod mjerena s **konstantnim naponom** povećanjem T smanjuje se R_T zbog čega se povećava disipirana snaga na otporniku ($\frac{U^2}{R_T}$). To uvjetuje daljnje povećanje temperature termistora, dodatno smanjenje R_T te može dovesti do uništenja termistora (pozitivna povratna veza).

Korištenje NTC termistora za detekciju razine tekućine:

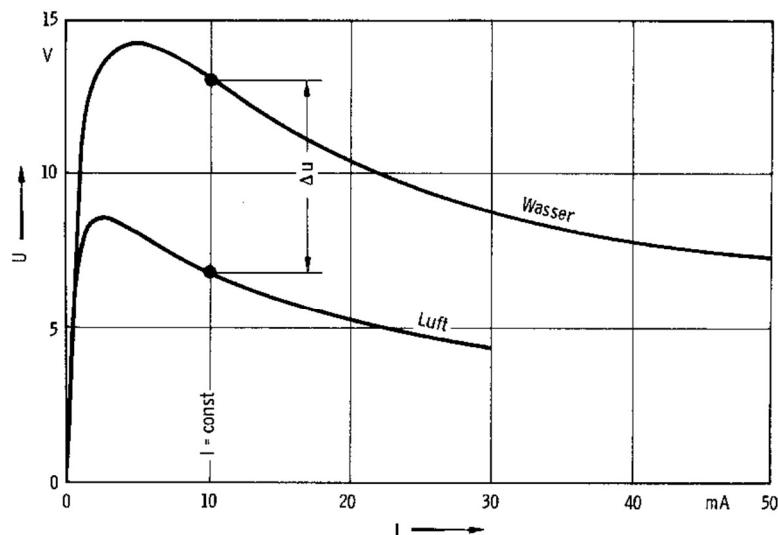


Abb. 2.4.4 Lineare Darstellung der Strom-Spannungs-Kennlinie für unterschiedliche Umgebungsmedien

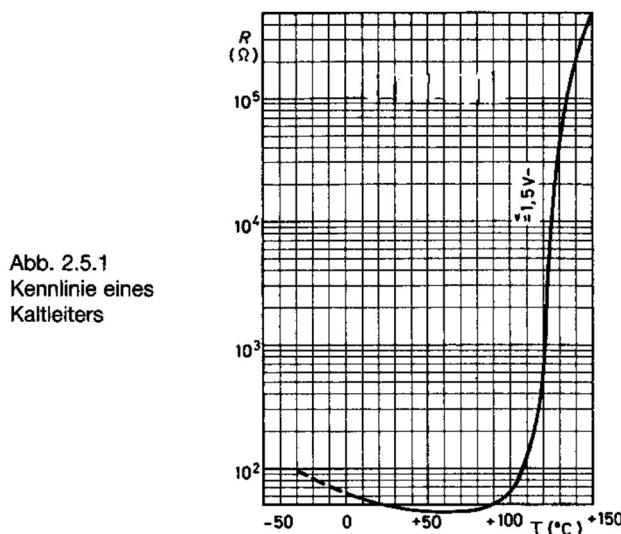
PTC termistor

Za razliku od NTC termistora, PTC termistorima otpor raste s povećanjem temperature.

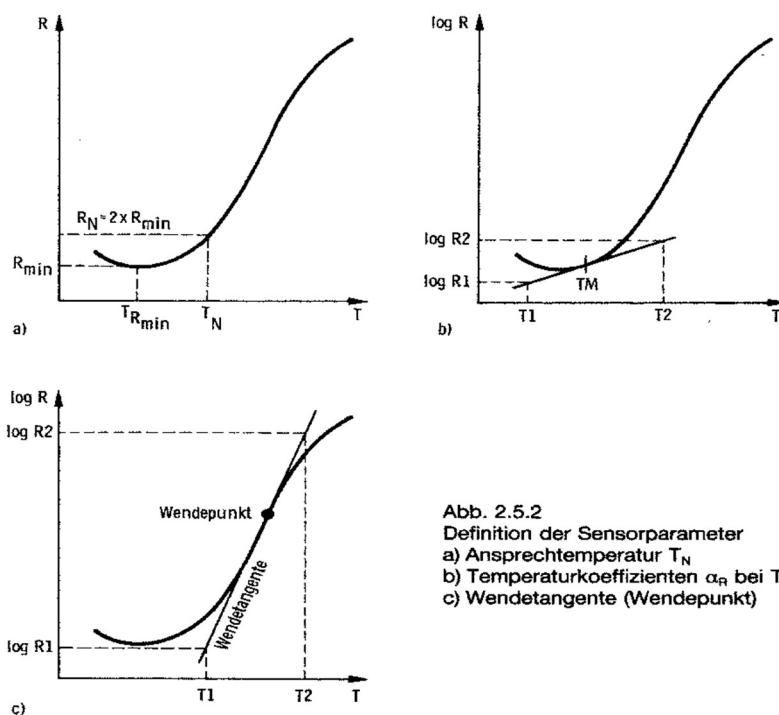
Izrađuju se od smjese barij-karbonata, stroncij-oksida i titan-oksida (npr. BaTiO_3). Zbog vrlo strme karakteristike $R(T)$ ne koriste se za mjerjenje temperature nego kao element za zaštitu.

PROMJENA OTPORA S TEMPERATUROM:

Izrazito nelinearni:

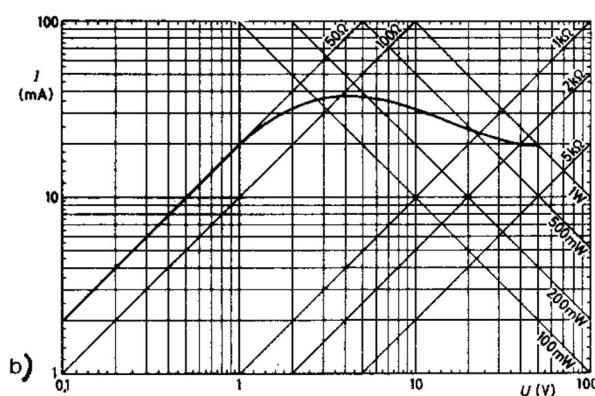
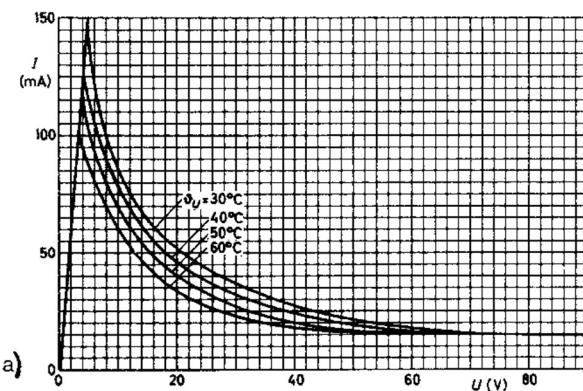


Karakteristične točke:



T_N – nazivna temperatura – temperatura početka strmog porasta (-30, 0, 40, 60, 80, 120, 160, 180, 220 °C)

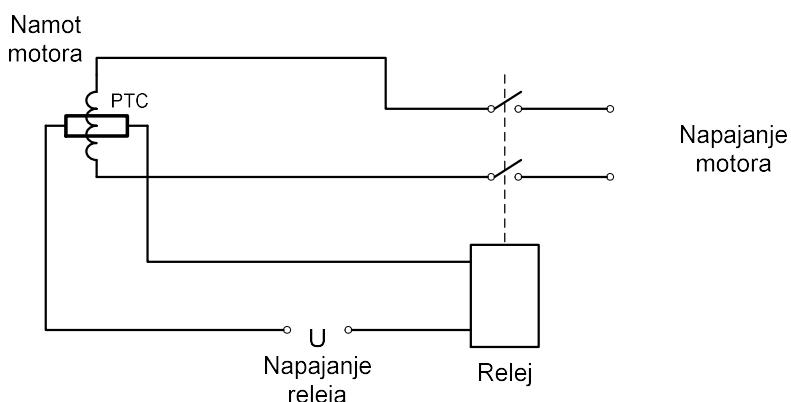
I(U) karakteristika:



Uslijed samozagrijavanja raste otpor što rezultira smanjenjem struje.

Najčešća primjena:

- u zaštitnim krugovima za zaštitu od pregrijavanja (npr. namot elektromotora)
- za mjerjenje razine



Na normalnoj radnoj temperaturi elektromotora PTC ima mali otpor pa je struja I dovoljna da relaj bude u pobuđenom stanju, tj. motor je priključen na mrežu. Kada temperatura namota motora pređe T_C , R_T naglo raste, struja namota relaja se smanjuje i prekida napajanje motora.

Izvedbe PTC termistora:

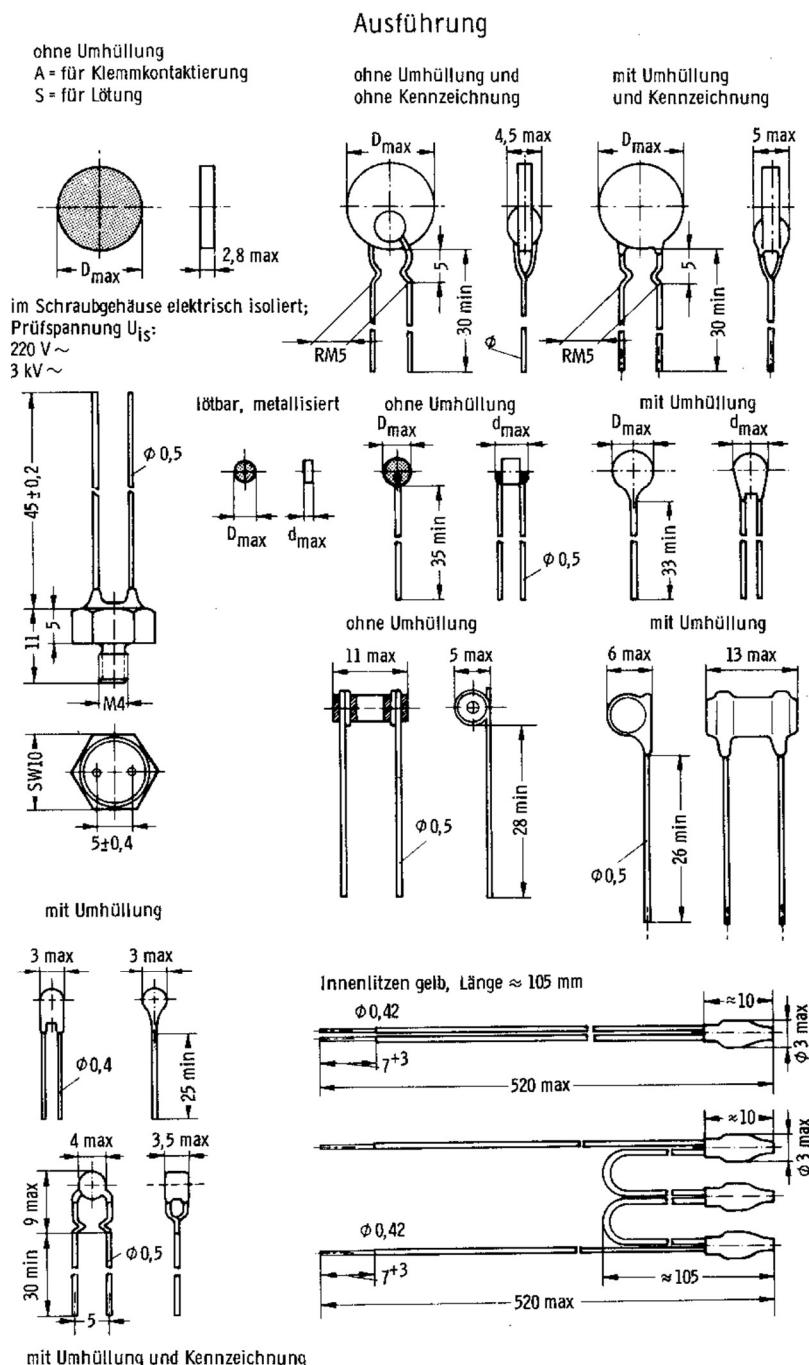
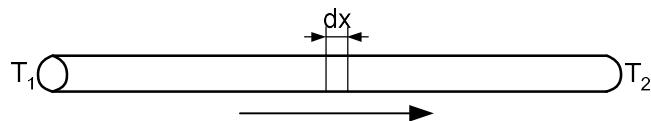


Abb. 2.5.8 Unterschiedliche Ausführungsformen von Kaltleiter-Temperatursensoren (Siemens AG)

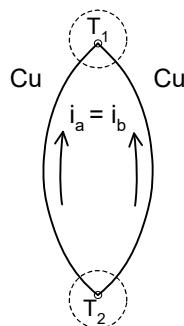
SEEBECK-OV EFEKT



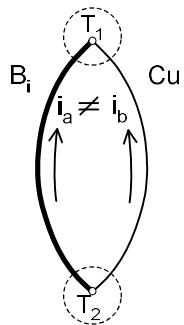
Temperaturni gradijent uzduž vodiča uzrokuje električno polje.

Thompsonov efekt: $dV_a = \alpha_a(T) \frac{dT}{dx} dx$ gdje je $\alpha_a(T)$ absolutni Seebeck-ov koeficijent materijala. Za homogeni materijal $\alpha_a(T)$ je konstantno duž vodiča pa možemo pisati $dV_a = \alpha_a(T) dT$

- slobodni elektroni u metalu ponašaju se kao idealni plin
- kinetička energija elektrona funkcija je temperature materijala
- u različitim materijalima, gustoća i energija elektrona se razlikuju
- kada dva različita materijala dođu u kontakt slobodni elektroni difundiraju kroz spoj (kontakt)
- materijal koji prima elektrone postaje negativniji a materijal koji daje elektrone postaje pozitivniji
- gradijent koncentracije elektrona na spoju uzrokuje električko polje koje uravnotežuje proces difuzije
- ako se međusobno spoje i drugi krajevi vodiča, a oba spoja su na istoj temperaturi, električka polja na oba spoja se poništavaju, što nije slučaj kad su spojevi na različitim temperaturama



Ako su obje grane od istog materijala u petlji ne teče struja jer su polja jednaka pa se poništavaju.

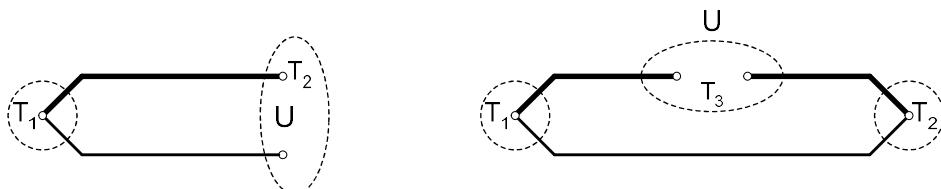


Termoelektrički efekt vidljiv je ako su materijali različiti. Napon (Seebeck-ov napon) koji mjerimo ovisi samo o razlici temperatura i materijalima vodiča. Struja ovisi o obliku i duljini vodiča.

TERMOPAR (engl. Thermocouple):

Aktivni pretvornik, koristi termoelektrički efekt – Seebeckov efekt.

Izravna pretvorba termičke u električku energiju



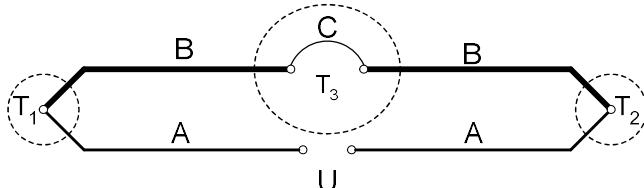
$$U = \alpha(T_1 - T_2)$$

Gdje je:

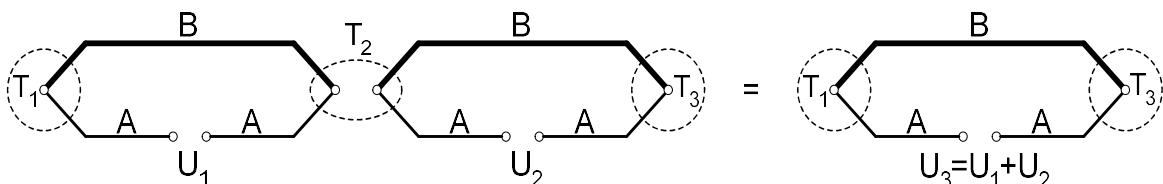
- α Seebeckov koeficijent koji tipično iznosi od $5 - 50 \mu\text{V/K}$
- T_1 temperatura mjernog objekta
- T_2 temperatura okoline

Temeljna pravila spajanja termoparova:

1. **Zakon homogenog materijala:** Termoelektrička struja ne teče u homogenom strujnom krugu.
2. **Zakon ubačenog materijala:** Algebarska suma termoelektričkih napona u strujnom krugu koji se sastoji od više spojeva različitih materijala biti će nula ako su svi spojevi na istoj temperaturi.
Zahvaljujući ovom zakonu možemo ubaciti voltmeter u strujni krug, a da ne utječemo na pokazivanje.
Spoj se smije ostvariti trećim metalom, npr. lemljenjem (metal "C").



3. **Zakon sumacije međutemperature:** Ako (T_1, T_2) daje U_1 i (T_2, T_3) daje U_2 , tada (T_1, T_3) daje $U_1 + U_2$.



Usporedba nekih standardnih tipova termoparova:

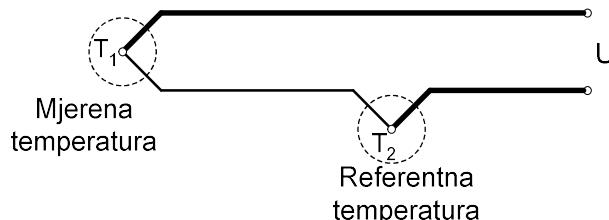
Parametar	J	K	N	T	R
Tmin [°C]	-40	-200	-230	-250	-50
Tmax [°C]	+850	+1100	+1230	+400	+1350
Točnost [°C], klasa 2	±2.5	±2.5	±2.5	±1	±2
+ materijal	Fe	Chromel 90% Ni, 10% Cr	Nicrosil 84% Ni, 14% Cr, ostalo Si, Fe, C	Cu	Pt
- materijal	Constantan 55% Cu, 45% Ni	Alumel 95% Ni, 2% Al, 2% Mn, 1% Si	Nisil 95% Ni, 4.5% Si, ostalo Fe, C, Mg, Cr	Constantan 55% Cu, 45% Ni	87% Pt, 13% Rh
Seebeckov koeficijent [$\mu\text{V/K}$] @ 273 K	50	39	39	39	5

Norme: IEC 60584-1:2013 Thermocouples - Part 1: EMF specifications and tolerances
 IEC 60584-3:2007 Thermocouples - Part 3: Extension and compensating cables - Tolerances and identification system

Problem kod mjerjenja: promjena temperature "hladnog" kraja.

Kompenzacija temperature hladnog kraja ("Cold" Junction Compensation)

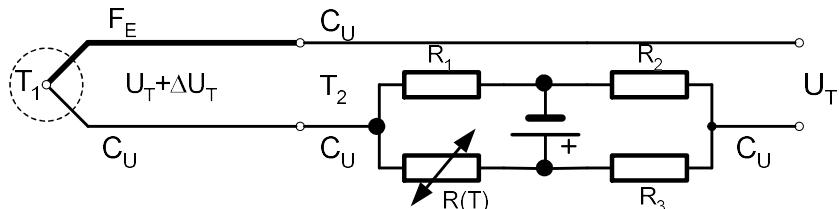
Ako je temperatura okoline T_2 konstantna tada je napon U proporcionalan s temperaturom mernog objekta T_1 .



Referentnu temperaturu T_2 može se održavati konstantnom (npr. 0°C) na više načina:

- držanjem hladnog kraja u posudi sa komadićima leda,
- upotrebom Peltierovog hladila,
- električkim grijačem.

Elektronička kompenzacija promjene temperature okoline



Promjenom temperature T_2 mijenja se otpor NTC-a što uzrokuje disbalans mosta. Na mostu se javlja napon koji mora kompenzirati promjenu napona termopara zbog promjene temperature T_2 .

Na laboratorijskim vježbama koristit će se Termopar K-tipa spojen na **MAX6675** (Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter) koji koristi poluvodički temperaturni pretvornik za mjerjenje temperature hladnog spoja.

AD594/AD595 – Monolithic Thermocouple Amplifiers with Cold Junction Compensation.

Promjena napona termopara i Seebeckovog koeficijenta s temperaturom:

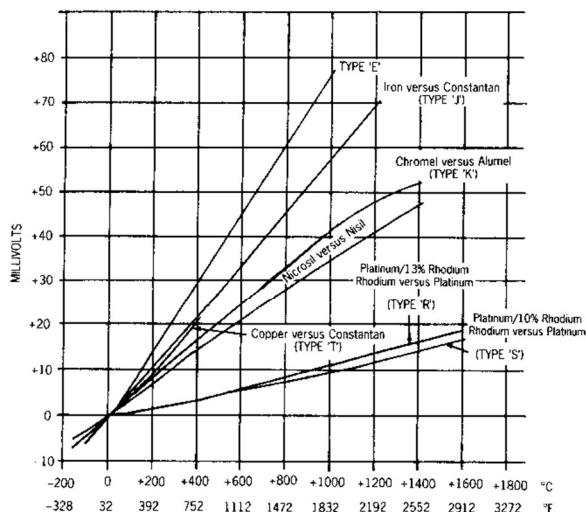


FIG. 4.16b

The millivoltage generated by thermocouples varies with wire materials and is a nonlinear function of temperature.

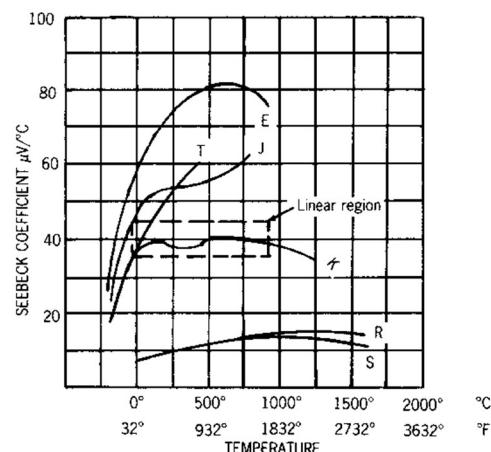


FIG. 4.16c

The Seebeck coefficient gives the amount of voltage generated (in microvolts) by a one degree change in temperature. The value of the Seebeck coefficient varies not only with thermocouple type but also with temperature.¹

INTEGRIRANI TERMOPAROVI - THERMOPILE:

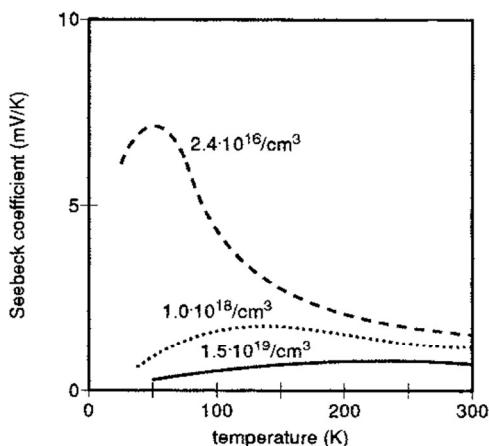


Figure 4.12 Seebeck coefficient of p-type silicon for various doping concentrations.

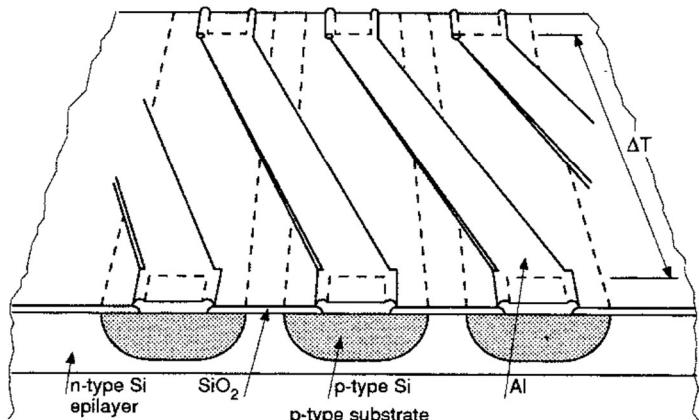
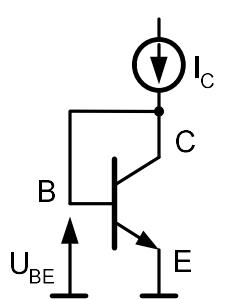


Figure 4.13 A schematic drawing of a p-type-Si/aluminium thermopile integrated in an n-type epilayer

POLUVODIČKI TEMPERATURNI PRETVORNICI

Koristi se temperaturna karakteristika PN spoja.
Tranzistor u spoju diode – kolektor spojen na bazu.



$$I_C = I_S e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}$$

iz čega slijedi $U_{BE} = U_T \ln \frac{I_C}{I_S} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_C}{I_S}$ gdje
je:
 k – Boltzmanova konstanta $1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K
 T – temperatura u kelvinima
 q – naboj elektrona $1.6 \cdot 10^{-19}$ C
 I_C – kolektorska struja
 I_S – reverzna struja zasićenja

Prednosti:

- jeftin,
- ujednačena kvaliteta (kontrolirani proces),
- veliki temperaturni koeficijent u usporedbi sa otporničkim temperaturnim pretvornicima i termoparovima,
- linearniji od otporničkih pretvornika i termoparova,
- lako se integrira u monolitne temperaturne senzore.

Nedostaci:

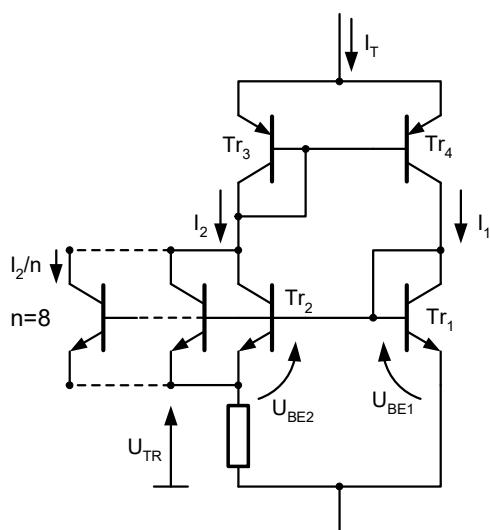
- U_{BE} varira od tranzistora do tranzistora,
- reverzna struja zasićenja I_S je temperaturno ovisna, varira sa T^3 .

Ukupni temperaturni koeficijent iznosi $-2 \text{ mV}/\text{°C}$.

Ukupna točnost je $\pm 3 \text{ mV}$ uključujući nelinearnost koja je tipično unutar $\pm 1^\circ\text{C}$ u području od -40°C do $+150^\circ\text{C}$.

Struja I_C se namješta na 0.1 mA da se izbjegne problem samozagrijavanja. Za veće temperature se mora uračunati i taj efekt.

U cilju izbjegavanja problema s reverznom strujom I_S koristi se sljedeći spoj:



$$\begin{aligned} U_{TR} + U_{BE2} &= U_{BE1} \\ U_{TR} &= U_{BE1} - U_{BE2} \\ U_{BE1} &= U_T \ln \frac{I_1}{I_S} \\ U_{BE2} &= U_T \ln \frac{I_2}{nI_S} \\ U_{TR} &= U_T \ln \frac{I_1}{I_S} - U_T \ln \frac{I_2}{nI_S} \\ U_{TR} &= U_T \ln \frac{nI_1}{I_2} \quad \text{ne ovisi o } I_S \end{aligned}$$

Tranzistori Tr_3 i Tr_4 čine strujno zrcalo izvedeno s lateralnim pnp tranzistorima.
Topološki se tranzistor Tr_2 izvodi kako paralelni spoj n tranzistora Tr_1 .

Za strujno zrcalo vrijedi: $I_1 \equiv I_2 = I$

Primjer: AD590 ima $n = 8$.

$$U_{TR} = U_T \ln 8 = \left(\frac{k}{q} \ln 8 \right) T = 179 \text{ } \mu\text{V} \cdot T$$

Iz gornje se formule vidi da je u tom slučaju napon U_{TR} proporcionalan s temperaturom.

Ukupna struja kroz sklop je:

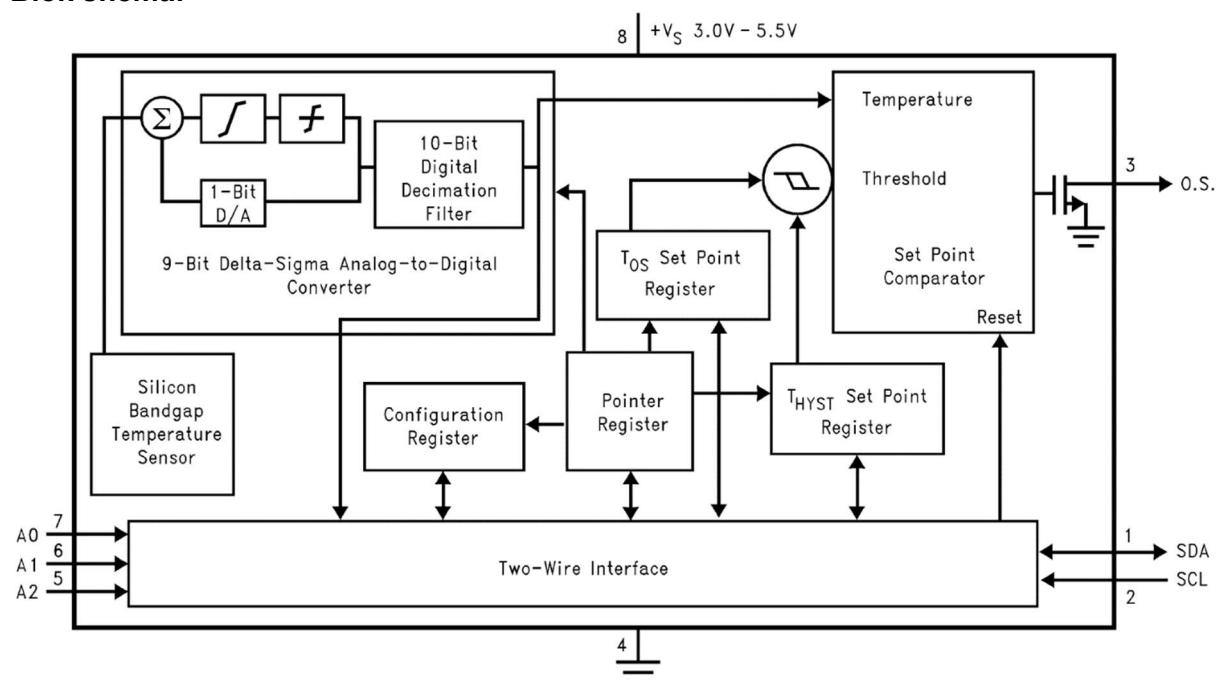
$$I_T = 2I = 2 \frac{U_{TR}}{R} = \left(2 \frac{k}{qR} \ln 8 \right) T$$

Što uz otpornik $R = 358 \Omega$ daje

$$I_T = 1 \text{ } \mu\text{A} \cdot T \Rightarrow \frac{I_T}{T} = 1 \text{ } \mu\text{A} / K \quad - \text{linearna ovisnost struje o temperaturi.}$$

Integrirani temperaturni senzor LM75

Blok shema:



Rezolucija: $\pm 0.55 \text{ } ^\circ\text{C}$

Točnost: $\pm 2\%$ od $-25 \text{ } ^\circ\text{C}$ do $+100 \text{ } ^\circ\text{C}$

Potrošnja: $250 \text{ } \mu\text{A}$ za vrijeme rada, $10 \text{ } \mu\text{A}$ sleep mode

Na laboratorijskim vježbama koristit će se tri poluvodička pretvornika temperature:

DS18B20	Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer
LM35	Precision Centigrade Temperature Sensors
TMP100, TMP101	Temperature Sensor With I2C and SMBus Interface with Alert Function in SOT-23 Package

Temperaturna sonda za univerzalni instrument: Fluke 80T-150U