

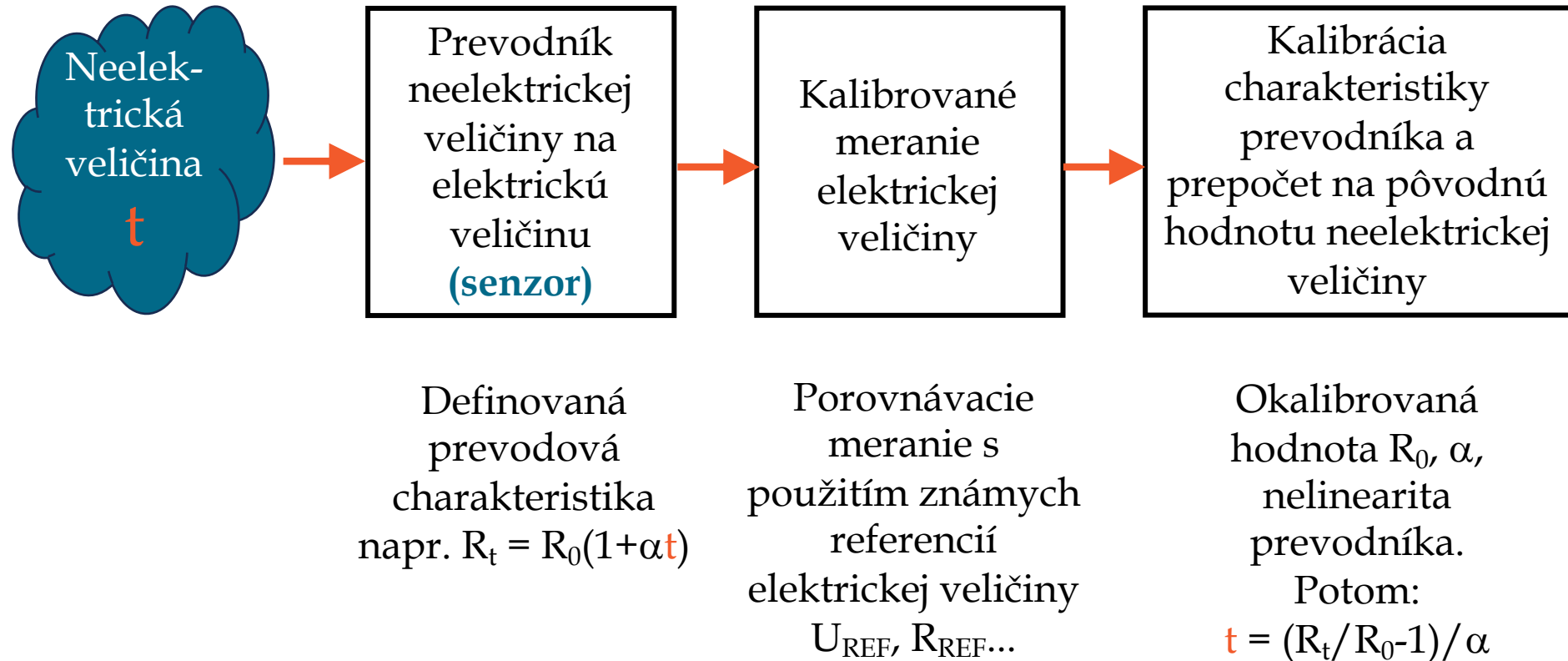


# Meranie a kalibrácia neelektrických veličín

## teplota

Daniel Valúch, Marián Hubinský  
18. - 21. marec 2024, Spojená škola, Banská Bystrica

# Merací reťazec



# Prevodníky teplota - elektrická veličina

Najčastejšie používané princípy

## 1. Zmena odporu ako funkcia teploty

- Termistor so záporným teplotným koeficientom (Negative Temperature Coefficient Thermistor NTC)
- Odporový detektor teploty (Resistance Temperature Detector, RTD)

## 2. Generované napätie ako funkcia teploty

- Termočlánok (Thermocouple)

## 3. Aktívne budovaný systém a úbytok napätia ako funkcia teploty

- Polovodičový priechod (Semiconductor-Based Sensor)

## 4. Detektory elektromagnetického žiarenia

- Bolometer (cez teplo)
- Fotodetektor (priama premena)

# Termistor NTC

Rezistor vytvorený z polovodivého materiálu

- Objavené v 1833 Michaelom Faradayom, ktorý skúmal polovodivé materiály na báze sulfidu striebra
- V súčasnosti polovodiče na báze oxidov mangánu, niklu, kobaltu, medi alebo železa
- Termistor neobsahuje P-N priechody
- Odpor sa výrazne mení s teplotou (exponenciálne)
- NTC má záporný teplotný koeficient odporu

Elektricky predstavuje meranie teploty termistorom problém merania odporu s vysokým dynamickým rozsahom

# Termistor NTC

Hodnota odporu ako funkcia teploty (zjednodušená verzia)

$$R_{T_1} = R_{T_2} e^{B\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)}$$

Kde:

$R_{T_1}$  je hodnota odporu pri teplote  $T_1$  (K)

$R_{T_2}$  je hodnota odporu pri teplote  $T_2$  (K). Typ. 25 °C, t.j. 298.16 K

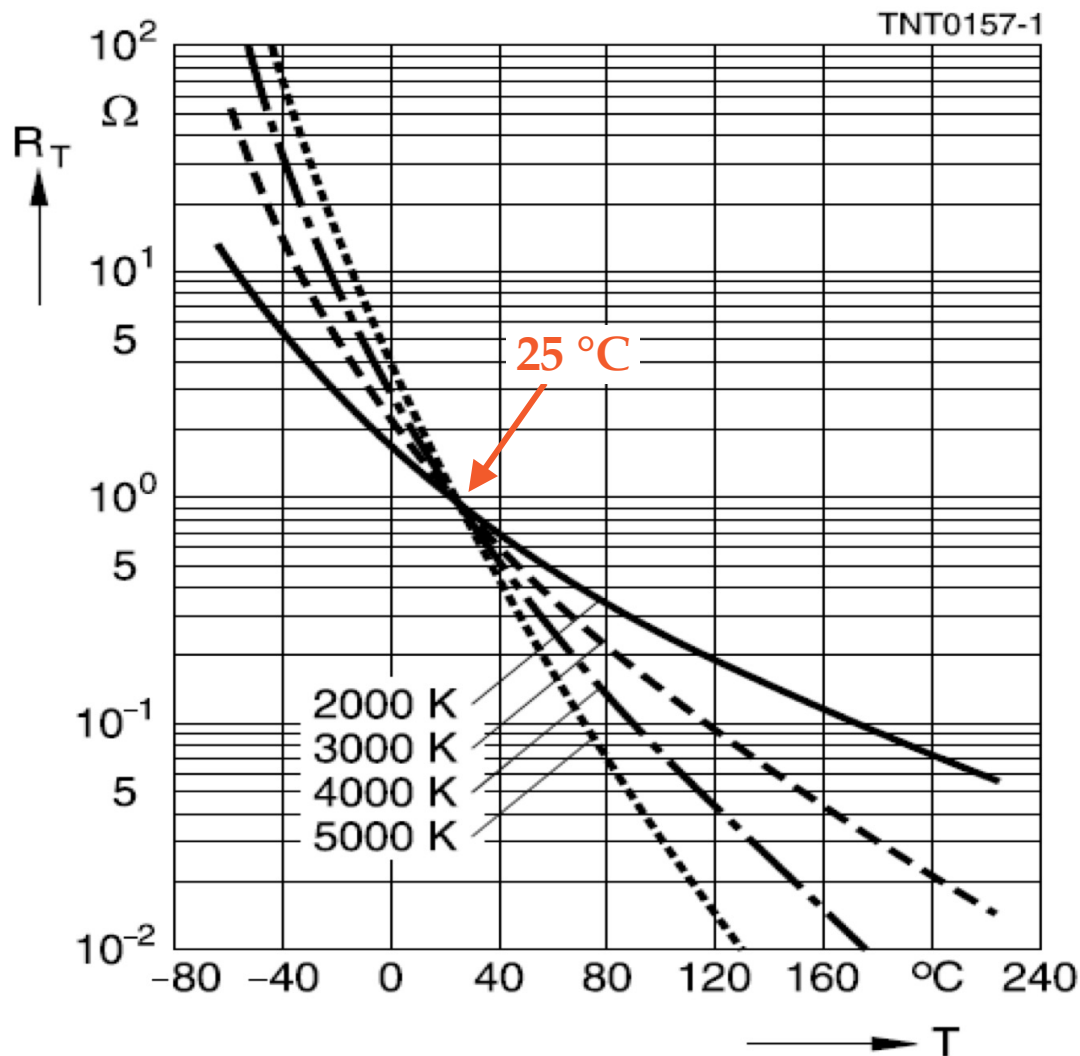
$B$  je materiálová konštanta pre konkrétny termistor (K). Typ. 3000 K-5000 K

Presnejšia Steinhart-Hart aproximácia

$$R_{T_1} = R_{25} e^{\left(A + \frac{B}{T} + \frac{C}{T^2} + \frac{D}{T^3}\right)}$$

Hodnoty  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  nájdeme v dátovom liste termistora

# Termistor NTC



Ako referenčná hodnota teploty sa obyčajne používa 25  $^{\circ}\text{C}$ , t.j. 298.16 K

$$R_{T1} = R_{25} e^{B\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_{25}}\right)}$$

$$R_{T1} = R_{25} e^{\left(A + \frac{B}{T} + \frac{C}{T^2} + \frac{D}{T^3}\right)}$$

Graf:

[https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/product/sensor/ntc/ntc\\_element/general\\_tech\\_info/ntc\\_thermistor\\_general\\_technical\\_information\\_digest\\_en.pdf](https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/product/sensor/ntc/ntc_element/general_tech_info/ntc_thermistor_general_technical_information_digest_en.pdf)

# Termistor NTC - výpočet teploty

Hodnota odporu ako funkcia teploty

$$R_{T_1} = R_{T_2} e^{B\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)} \quad R_{T_1} = R_{25} e^{\left(A + \frac{B}{T} + \frac{C}{T^2} + \frac{D}{T^3}\right)}$$

Výpočet teploty z nameranej hodnoty odporu

$$T = \frac{1}{\left[A_1 + B_1 \ln\left(\frac{R_T}{R_{25}}\right) + C_1 \ln^2\left(\frac{R_T}{R_{25}}\right) + D_1 \ln^3\left(\frac{R_T}{R_{25}}\right)\right]}$$

# Termistor NTC - dátový list




www.vishay.com

**NTCLE100E3**

Vishay BCcomponents

## ELECTRICAL DATA AND ORDERING INFORMATION

$R_{25}$ ( $\Omega$ )	$R_{25}$ -TOL. ( $\pm$ %)	$B_{25/85}$ (K)	$B_{25/85}$ -TOL. ( $\pm$ %)	UL RECOG.  US	SAP MATERIAL AND ORDERING NUMBER <sup>(1)</sup>	
					NTCLE100E3....B0/T1/T2 RoHS-COMPLIANT WITH EXEMPTION <sup>(2)</sup>	NTCLE100E3....B0A/T1A/T2A RoHS-COMPLIANT
330	5	3560	1.5	✓	331*B0	331*B0A
470	5	3560	1.5	✓	471*B0	471*B0A
680	5	3560	1.5	✓	681*B0	681*B0A
1000	2, 3, 5	3528	0.5	✓	102*B0	102*B0A
1500	2, 3, 5	3528	0.5	✓	152*B0	152*B0A
2000	2, 3, 5	3528	0.5	✓	202*B0	202*B0A

## PARAMETER FOR DETERMINING NOMINAL RESISTANCE VALUES

NUMBER	$B_{25/85}$ (K)	NAME	TOL. B (%)	A	B (K)	C (K <sup>2</sup> )	D (K <sup>3</sup> )	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub> (K <sup>-1</sup> )	C <sub>1</sub> (K <sup>-2</sup> )	D <sub>1</sub> (K <sup>-3</sup> )
1	2880	Mat O. with B <sub>n</sub> = 2880K	3	- 9.094	2251.74	229098	- 2.744820E+07	3.354016E-03	3.495020E-04	2.095959E-06	4.260615E-07
2	2990	Mat P. with B <sub>n</sub> = 3990K	3	- 10.2296	2887.62	132336	- 2.502510E+07	3.354016E-03	3.415560E-04	4.955455E-06	4.364236E-07
7	3560	Mat H. with B <sub>n</sub> = 3560K	1.5	- 13.0723	4190.574	- 47158.4	- 1.199256E+07	3.354016E-03	2.884193E-04	4.118032E-06	1.786790E-07





# Termistor NTC - aplikácie

- + NTC má vysokú citlivosť na zmenu teploty
- + Existujú veľmi lacné termistory (jednotky centov)
- + Existujú veľmi presné termistory (absolútna chyba 0,01 °C)
- Obmedzený rozsah teplôt, typicky -50...+150 °C
- Exponenciálna charakteristika vyžaduje vysoký dynamický rozsah merania



# Termistor NTC - literatúra

- Vishay NTC thermistors <https://www.vishay.com/docs/29053/ntcappnote.pdf>
- TDK NTC Thermistor General Information - Technical Overview [https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/product/sensor/ntc/ntc\\_element/general\\_tech\\_info/ntc\\_thermistor\\_general\\_technical\\_information\\_digest\\_en.pdf](https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/product/sensor/ntc/ntc_element/general_tech_info/ntc_thermistor_general_technical_information_digest_en.pdf)
- Fluke Calibration <https://eu.flukecal.com/products/temperature-calibration/probes-sensors/thermistors>
- BIPM Guides to Thermometry - Guide to Secondary Thermometry - Thermistor Thermometry (2014) <https://www.bipm.org/documents/20126/41773843/Guide-SecTh-Thermistor-Thermometry.pdf/87e2fdc8-14fc-e977-918e-b801752d06a0?version=1.3&t=1593014016288&download=true>

# Odporový detektor teploty RTD

Rezistor vyrobený z kovu so známym teplotným súčiniteľom odporu (Resistance Temperature Detector)

- Vynájdene v 1871 Sir William Siemens
- Prvá praktická aplikácia/produkt 1885, H. L. Callendar
- Odpor sa mení s teplotou (takmer lineárne)
- Rezistívne senzory majú kladný teplotný koeficient odporu
- Materiály
  - Pt najstabilnejšia, dobrá linearita,  $-260...+850\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\alpha \sim 3,9 \times 10^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
  - Cu najlepšia linearita,  $-100...+260\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\alpha \sim 4,3 \times 10^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
  - Ni najvyššia citlivosť,  $-100...+260\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\alpha \sim 6,7 \times 10^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

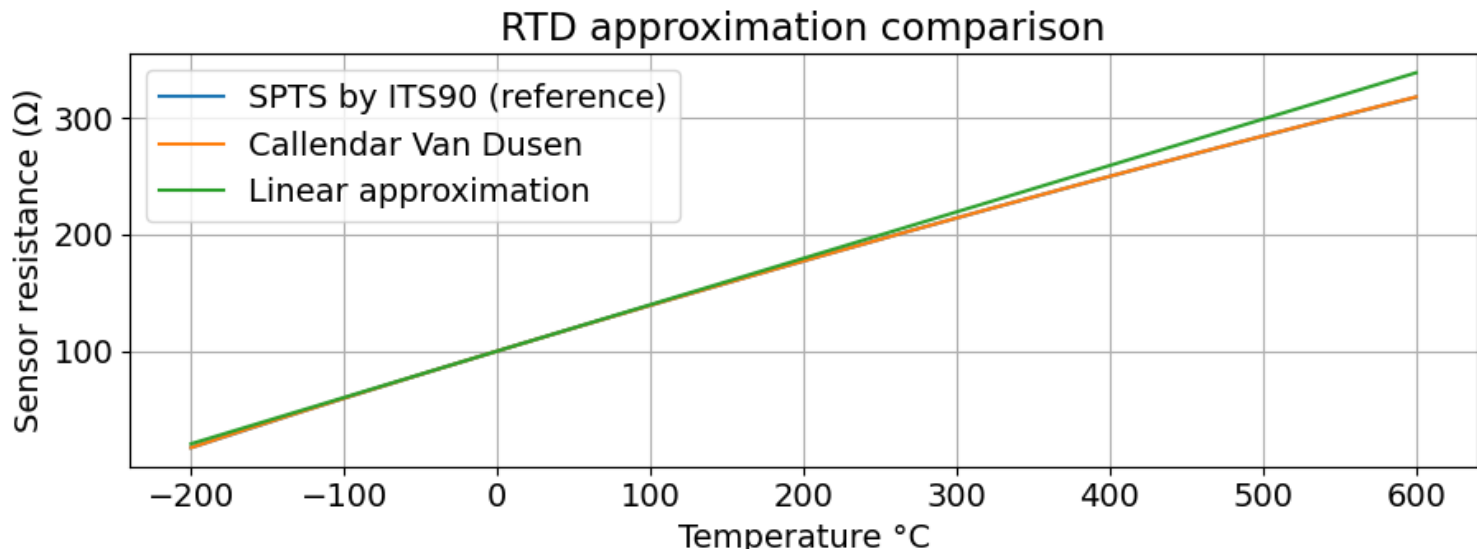
Elektricky predstavuje meranie teploty RTD senzorom problém merania odporu s vysokým rozlíšením

# Odporový detektor teploty RTD

Hodnota odporu ako funkcia teploty. Najpoužívanéjšie aproximácie (rovnice):

- Lineárna aproximácia
- Callendar – Van Dusen
- ITS-90

Typické hodnoty odporu 0,25-2,5-25-100-1000  $\Omega$



# Odporový detektor teploty RTD

Hodnota odporu ako funkcia teploty. Lineárna aproximácia

$$R_T = R_{0^\circ\text{C}}(1 + \alpha t)$$

Kde:

$R_T$  je hodnota odporu pri teplote  $t$  ( $^\circ\text{C}$ )

$R_{0^\circ\text{C}}$  je hodnota odporu pri teplote  $0$   $^\circ\text{C}$ , typ. 25, 100, 100  $\Omega$

$\alpha$  je materiálová konštanta pre platínu. Typ.  $3,851 \times 10^{-3}$   $^\circ\text{C}^{-1}$

Hodnota teploty sa z nameranej hodnoty odporu jednoducho vypočíta z rovnice

$$t = \frac{\frac{R_T}{R_{0^\circ\text{C}}} - 1}{\alpha}$$

# Odporový detektor teploty RTD

Hodnota odporu ako funkcia teploty. Callendar – Van Dusen aproximácia

$$R_T = \begin{cases} R_{0^\circ\text{C}}(1 + At + Bt^2) & 0^\circ\text{C} \leq t < 661^\circ\text{C} \\ R_{0^\circ\text{C}}(1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3) & -221^\circ\text{C} < t < 0^\circ\text{C} \end{cases}$$

Kde:

$R_T$  je hodnota odporu pri teplote  $t$  ( $^\circ\text{C}$ )

$R_{0^\circ\text{C}}$  je hodnota odporu pri teplote  $0^\circ\text{C}$ , typ. 25, 100, 100  $\Omega$

$A$ ,  $B$ ,  $C$  sú konštanty vypočítané z experimentálneho merania odporu

$A = 3.9083 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$   $B = -5,775 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$   $C = -4,183 \times 10^{-12} \text{ }^\circ\text{C}^{-3}$

Hodnota teploty sa z nameranej hodnoty odporu vypočíta ako korene kvadratickej rovnice (kladné  $t$ ), alebo numericky (záporné  $t$ )

# Odporový detektor teploty RTD

Hodnota odporu ako funkcia teploty. ITS-90 aproximácia

Pre teploty 13.8033 K - 273.16 K

$$W_r(T_{90}) = \exp \left( A_0 + \sum_{i=1}^{12} A_i \left[ \frac{\ln(T_{90}/273.16 \text{ K}) + 1.5}{1.5} \right]^i \right),$$

$$T_{90} = 273.16 \text{ K} \left( B_0 + \sum_{i=1}^{15} B_i \left[ \frac{W_r(T_{90})^{1/6} - 0.65}{0.35} \right]^i \right).$$

273.16 K - 1234.93 K

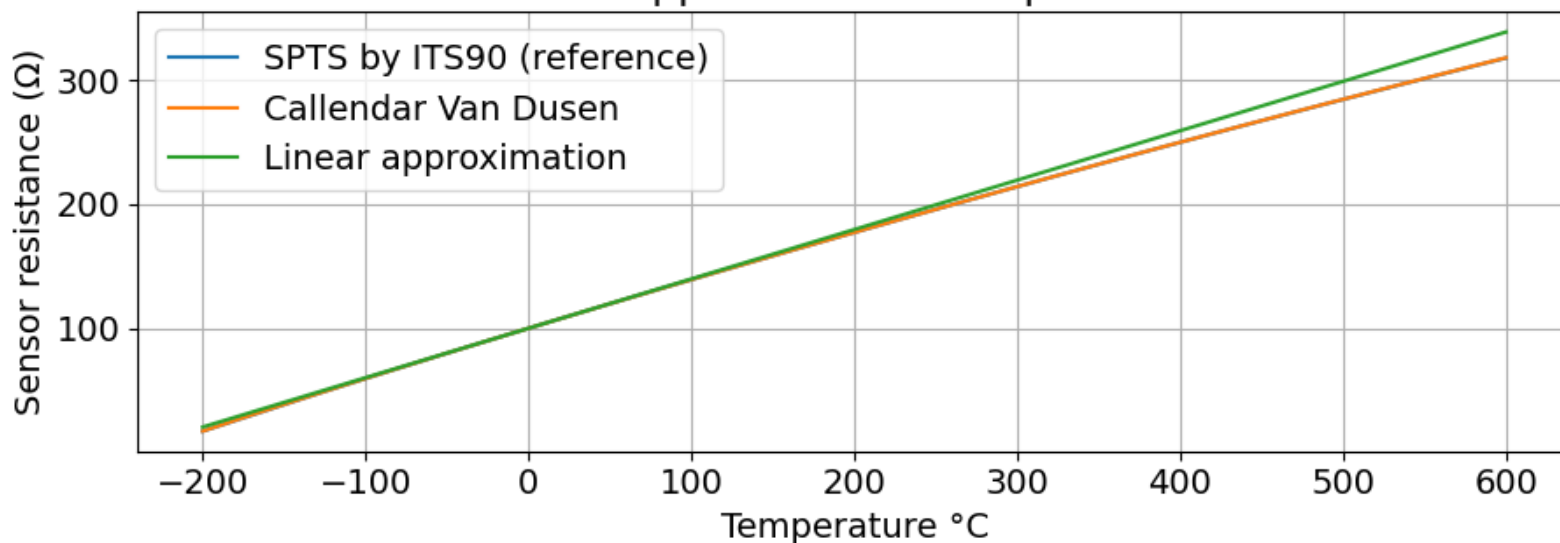
$$W_r(T_{90}) = C_0 + \sum_{i=1}^9 C_i \left[ \frac{T_{90}/\text{K} - 754.15}{481} \right]^i.$$

$$T_{90}/\text{K} = 273.15 + D_0 + \sum_{i=1}^9 D_i \left[ \frac{W_r(T_{90}) - 2.64}{1.64} \right]^i$$

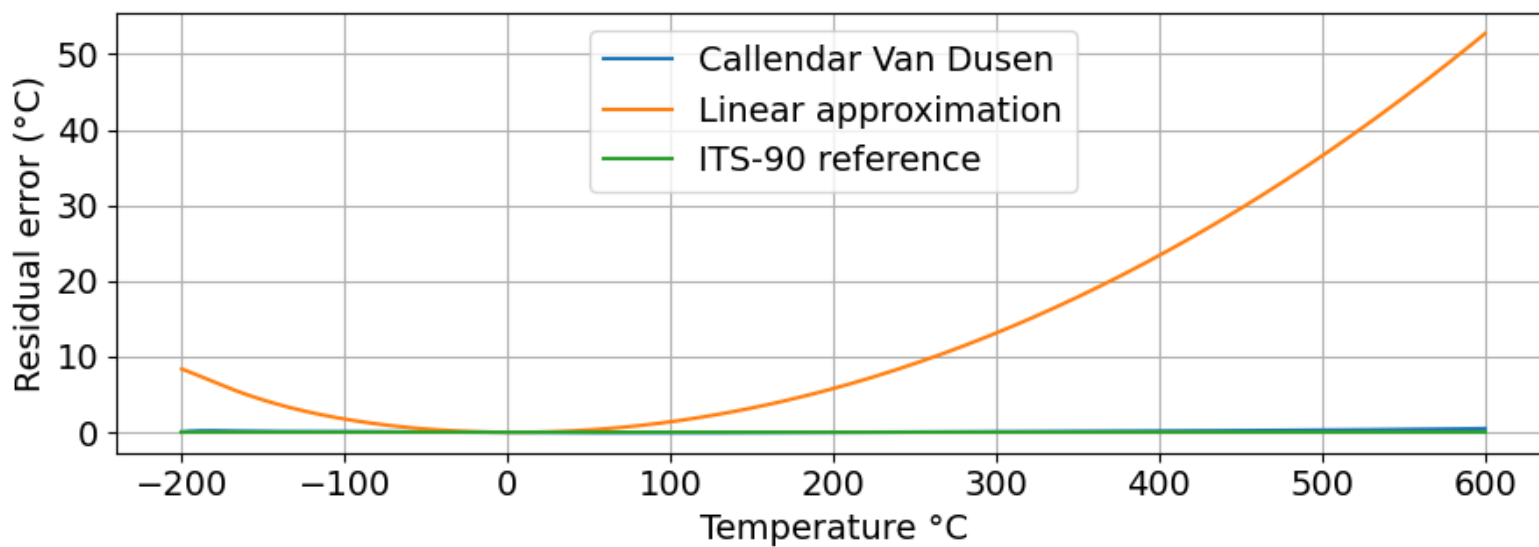
- Referenčné funkcie pre metrologické laboratóriá...
- Normalizovaná hodnota  $W_r$  platná pre všetky menovité odpory
- Zložitejšie na implementáciu, ale:
  - Úplne definované
  - Ľahko sa kalibrujú

$i$	$A_i$	$B_i$	$C_i$	$D_i$
0	-2.135 347 29	0.183 324 722	2.781 572 54	439.932 854
1	3.183 247 20	0.240 975 303	1.646 509 16	472.418 020
2	-1.801 435 97	0.209 108 771	-0.137 143 90	37.684 494
3	0.717 272 04	0.190 439 972	-0.006 497 67	7.472 018
4	0.503 440 27	0.142 648 498	-0.002 344 44	2.920 828
5	-0.618 993 95	0.077 993 465	0.005 118 68	0.005 184
6	-0.053 323 22	0.012 475 611	0.001 879 82	-0.963 864
7	0.280 213 62	-0.032 267 127	-0.002 044 72	-0.188 732
8	0.107 152 24	-0.075 291 522	-0.000 461 22	0.191 203
9	-0.293 028 65	-0.056 470 670	0.000 457 24	0.049 025
10	0.044 598 72	0.076 201 285		
11	0.118 686 32	0.123 893 204		
12	-0.052 481 34	-0.029 201 193		
13		-0.091 173 542		
14		0.001 317 696		
15		0.026 025 526		

## RTD approximation comparison

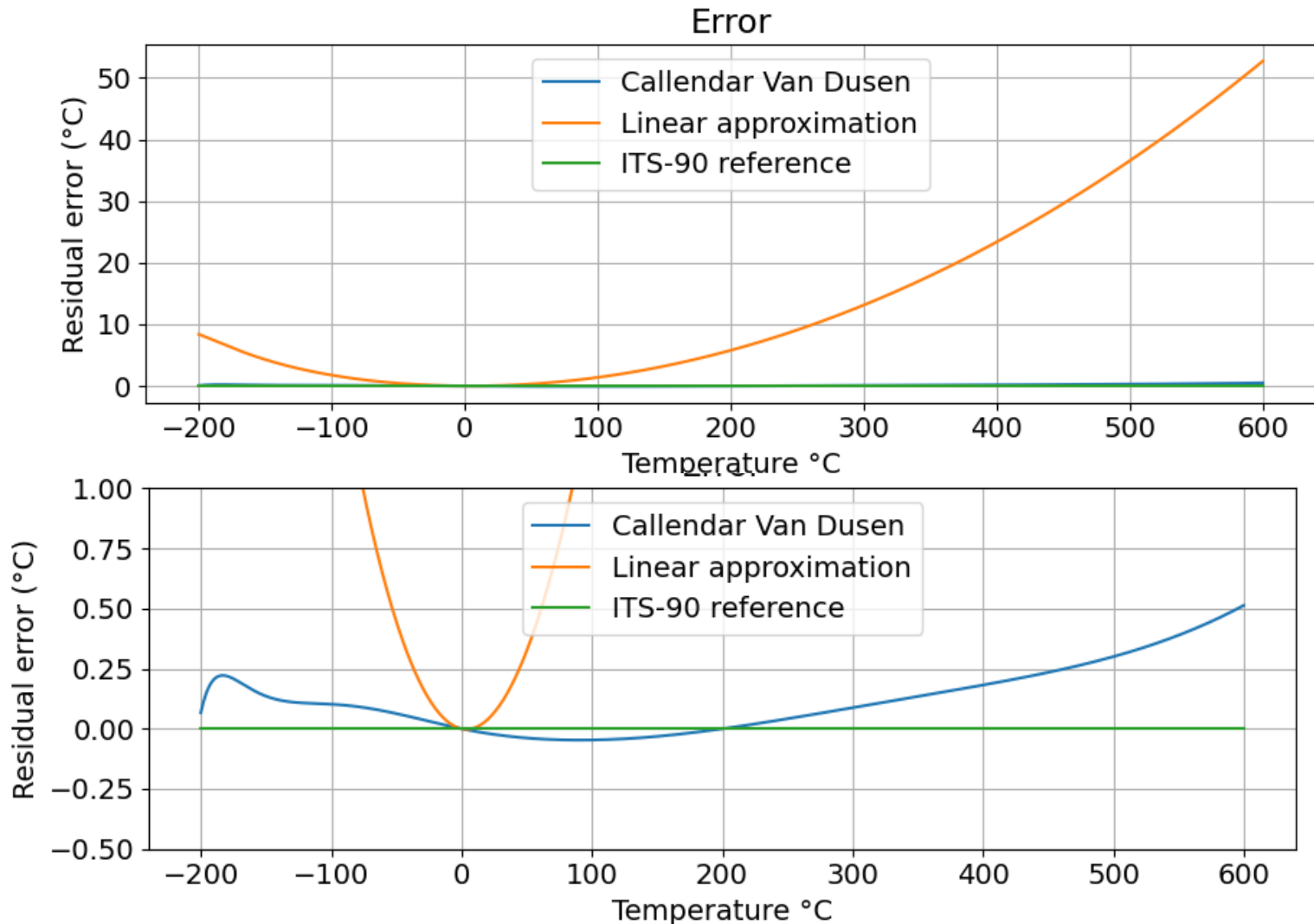


## Error



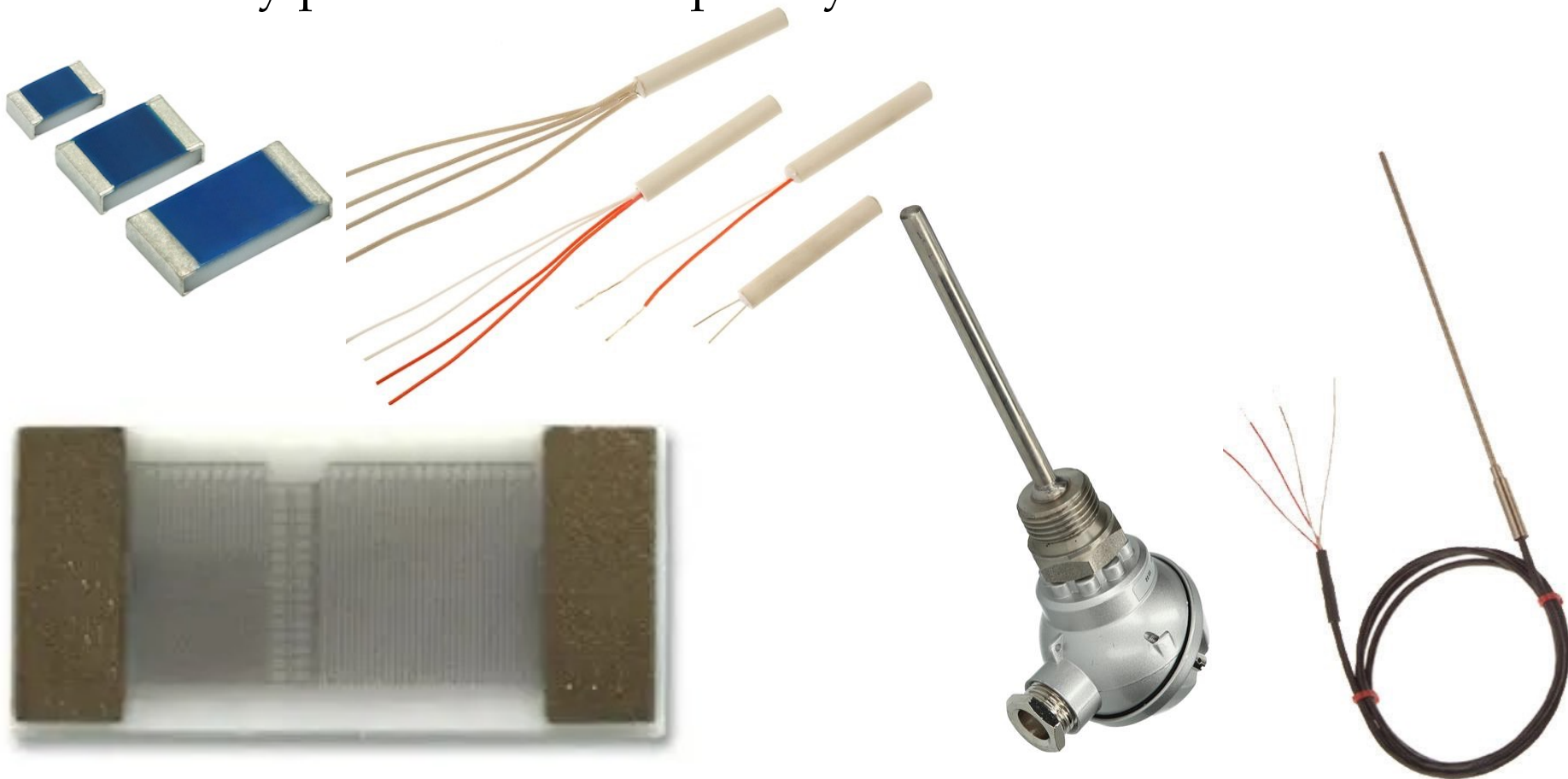


# Odporový detektor teploty RTD



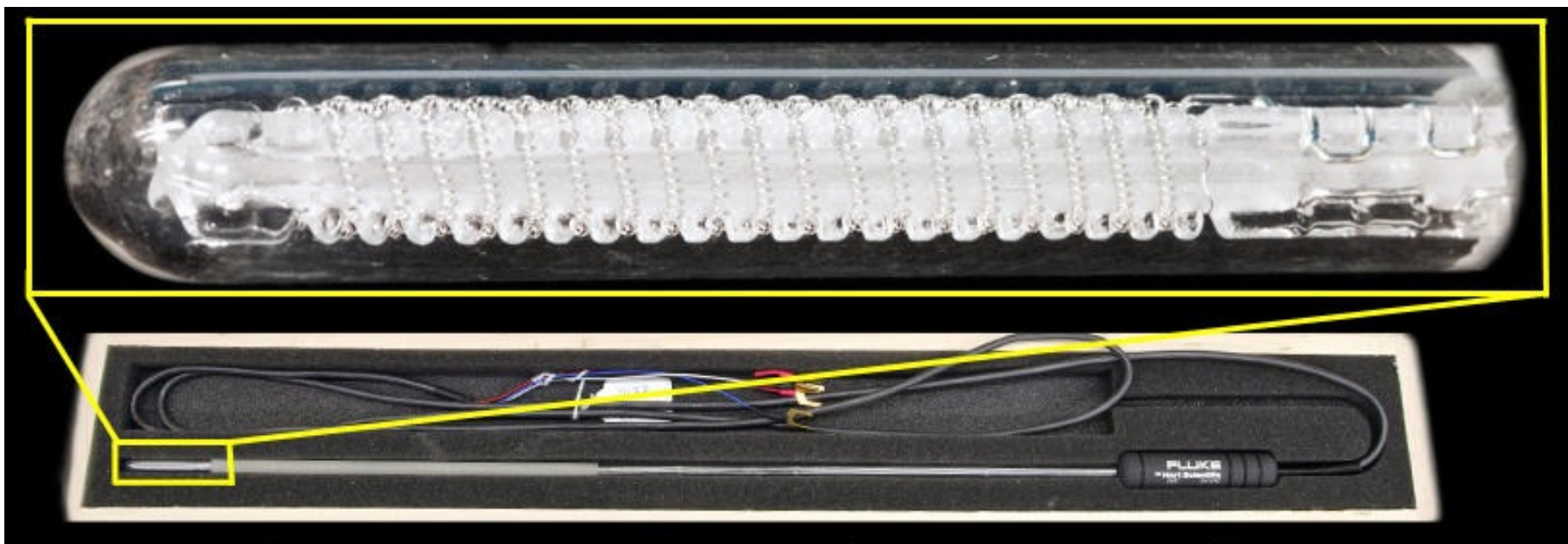
# Odporový detektor teploty RTD

Senzory pre elektroniku a priemysel



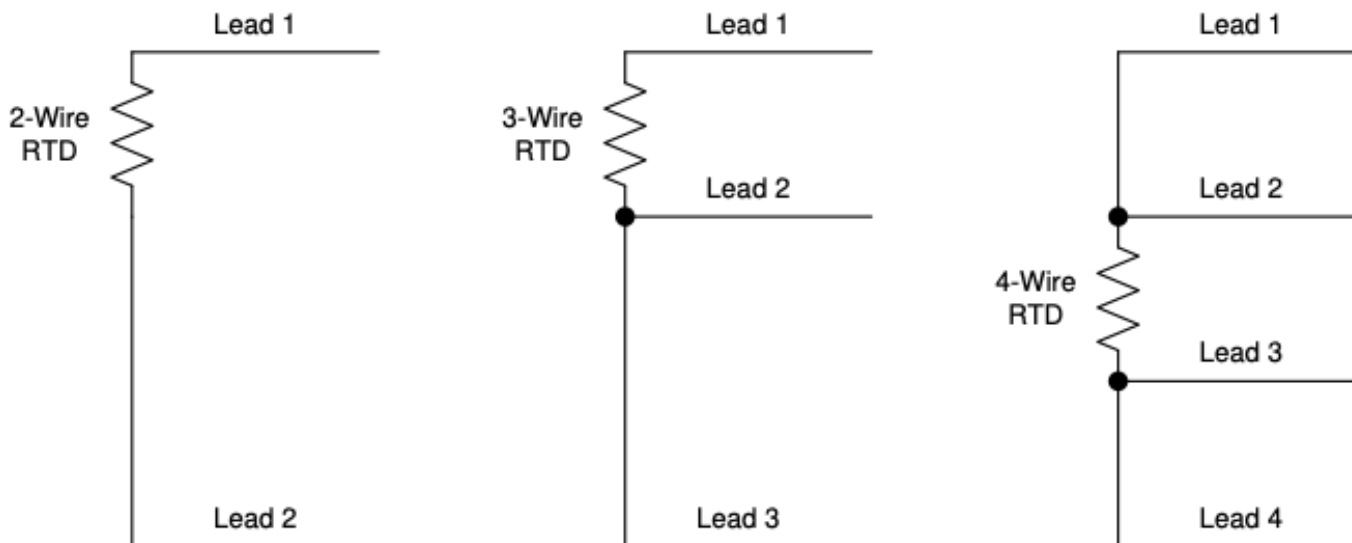
# Odporový detektor teploty RTD

Senzory pre metrológiu teploty



# Odporový detektor teploty RTD

Pripojenie senzora a meranie odporu



**Figure 1-3. Two-Wire, Three-Wire, and Four-Wire RTDs**

# Odporový detektor teploty RTD

## Pripojenie senzora a meranie odporu

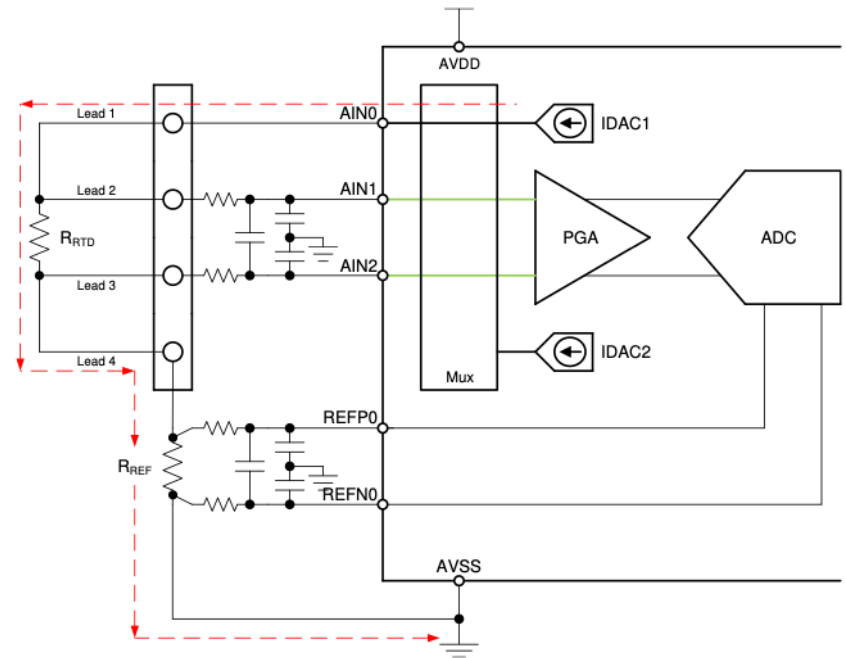
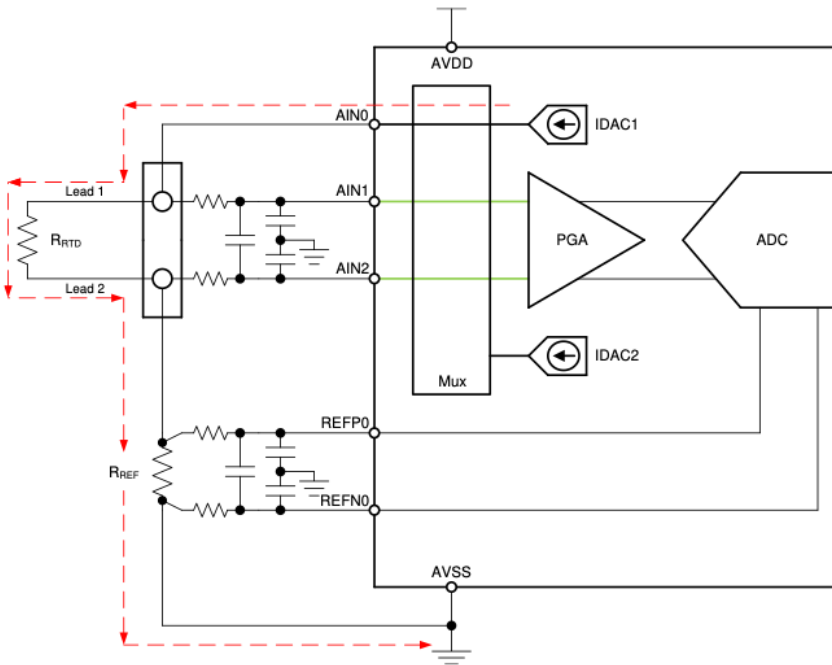


Figure 2-1. Two-Wire RTD, Low-Side Reference Measurement Circuit      Figure 2-6. Four-Wire RTD, Low-Side Reference Measurement Circuit

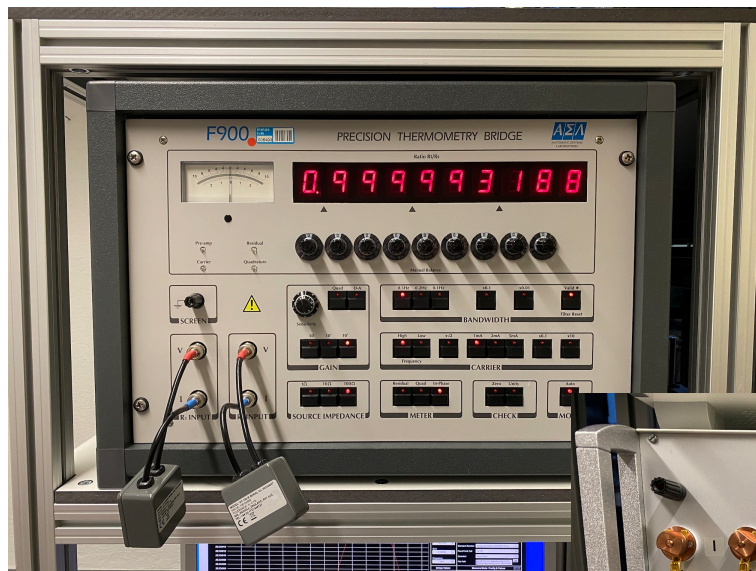
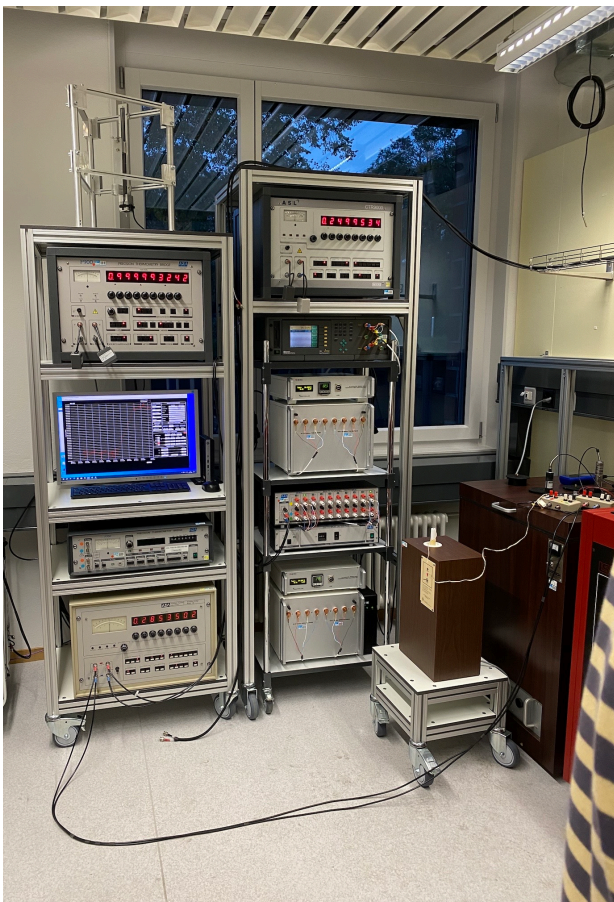
Texas Instruments Application Note

A Basic Guide to RTD Measurements <https://www.ti.com/lit/an/sbaa275a/sbaa275a.pdf>



# Odporový detektor teploty RTD

Meranie odporu precíznym porovnávacím AC mostíkom



# Odporový detektor teploty RTD

- + RTD senzor má stredne vysokú citlivosť na zmenu teploty
- + Širší rozsah teplôt, typicky
  - $-150\text{ °C} \dots +450\text{ °C}$  (priemysel),
  - $13,8033\text{ K} \dots 1234,93\text{ K}$  (metrológia ITS-90)
- + RTD sa používajú v aplikáciách s najvyššou presnosťou (absolútna chyba  $0,001\text{ °C}$ )
- + Vysoká stabilita a opakovateľnosť
- +/- Takmer lineárna charakteristika vyžaduje meranie odporu s vysokým rozlíšením
- Cena, najlacnejšie tenkovrstvové sensory začínajú na jednotkách €/ks

# RTD literatúra

- BIPM Guides to Thermometry – Guide to the Realization of the ITS-90: Platinum Resistance Thermometry <https://www.bipm.org/en/committees/cc/cct/guides-to-thermometry>
- BIPM Guides to Thermometry – Guide to Secondary Thermometry: Industrial Platinum Resistance Thermometers <https://www.bipm.org/en/committees/cc/cct/guides-to-thermometry>
- Texas Instruments Application Note A Basic Guide to RTD Measurements <https://www.ti.com/lit/an/sbaa275a/sbaa275a.pdf>



# Termočlánok (Thermocouple)

Vznik napätia pri spojení dvoch rôznych kovov

- Objavené v 1821 Thomas Johan Seebeck. Všimol si výchylku kompasu vedľa vodičov z rôzneho materiálu ak sa jeden koniec ohrial – termoelektrické napätie
- Používajú sa rôzne kombinácie kovov, podľa požadovaného teplotného rozsahu
- Generované napätie je takmer lineárna funkcia rozdielu teplôt
- Typická citlivosť desiatky  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$

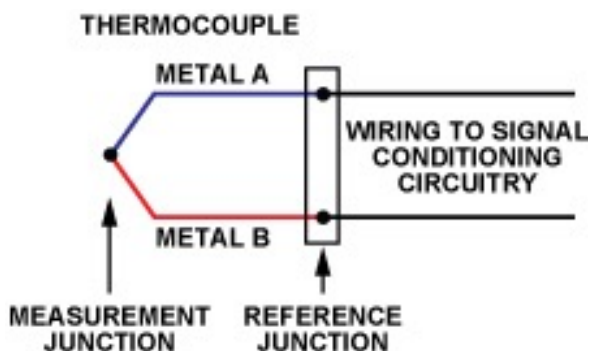
Elektricky predstavuje meranie teploty termočlánkom problém merania napätia veľmi nízkej hodnoty

# Termočlánok (Thermocouple)

## Najčastejšie používané materiály a teplotné rozsahy

**Table 1:** Summary of the commonly used thermocouple types.

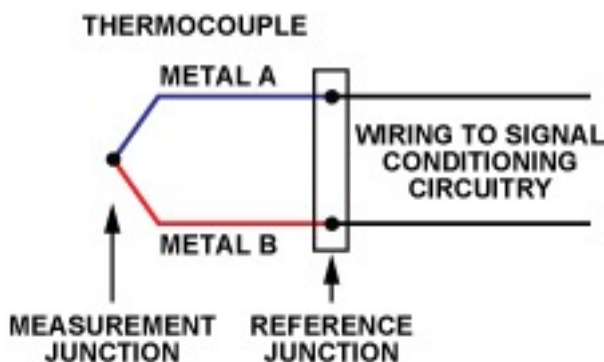
Thermocouple Type	Temperature range	Material description *	Typical usage
A	0 °C to 2500 °C	Tungsten/Rhenium	High temperatures, reducing atmospheres
B	0 °C to 1820 °C	Platinum/Rhodium	High temperatures, oxidising atmospheres
C	0 °C to 2315 °C	Tungsten/Rhenium	High temperatures, reducing atmospheres
E	-270 °C to 1000 °C	Chromel/Constantan	Medium and low temperatures, high output
J	-210 °C to 1200 °C	Iron/Constantan	Medium temperatures, reducing atmospheres
K	-270 °C to 1300 °C	Chromel/Alumel	Medium and low temperatures, general purpose oxidising
N	-270 °C to 1300 °C	Nicrosil/Nisil	Medium and low temperatures, general purpose oxidising
R	-50 °C to 1768 °C	Platinum/Rhodium	High temperatures, oxidising atmospheres, good accuracy
S	-50 °C to 1768 °C	Platinum/Rhodium	High temperatures, oxidising atmospheres, good accuracy
T	-270 °C to 400 °C	Copper/Constantan	Low temperatures, good accuracy
Au/Pt	0 °C to 1000 °C	Gold/Platinum	Medium temperatures, highest accuracy
Pt/Pd	0 °C to 1500 °C	Platinum/Palladium	High temperatures, highest accuracy



\* Chromel and Alumel are registered trademarks of Concept Alloys, Inc.

# Termočlánok (Thermocouple)

Najčastejšie používané materiály a teplotné rozsahy



ANSI Code	ANSI MC 96.1 Color Coding		Alloy Combination		Maximum T/C Grande temp. range	EMF(mv)Over Max.temp.range	IEC 584-3 Color Coding	IEC Code
	Thermocouple	Extension	+ Lead	- Lead				
<b>K</b>			NICKEL-CHROMIUM Ni-Cr	NICKEL-ALUMINUM Ni-Al	-270 to 1372°C -454 to 2501°F	-6.458 to 54.888		<b>K</b>
<b>J</b>			IRON Fe (magnetic)	CONTANTAN COOPER-NICKEL Cu-Ni	-210 to 1200°C -346 to 2193°F	-8.095 to 69.553		<b>J</b>
<b>T</b>			COPPER Cu	CONTANTAN COOPER-NICKEL Cu-Ni	-270 to 400°C -454 to 752°F	-6.258 to 20.872		<b>T</b>
<b>E</b>			NICKEL-CHROMIUM Ni-Cr	CONTANTAN COOPER-NICKEL Cu-Ni	-270 to 1000°C -454 to 1832°F	-9.835 to 76.373		<b>E</b>
<b>N</b>			NICROSIL Ni-Cr-Si	NISIL Ni-Si-Mg	-270 to 1300°C -450 to 2372°F	-4.345 to 47.513		<b>N</b>
<b>S</b>	NONE ESTABLISHED		PLATINUM-10% RHODIUM Pt-10%Rh	PLATINUM Pt	-50 to 1768°C -58 to 3214°F	-0.236 to 18.693		<b>S</b>
<b>R</b>	NONE ESTABLISHED		PLATINUM-13% RHODIUM Pt-13%Rh	PLATINUM Pt	-50 to 1768°C -58 to 3214°F	-0.226 to 21.101		<b>R</b>
<b>B</b>	NONE ESTABLISHED		PLATINUM-30% RHODIUM Pt-30%Rh	PLATINUM-6% RHODIUM Pt-6%Rh	0 to 1820°C 32 to 3308°F	0 to 13.820		<b>B</b>

<https://blazeprobes.com/types-thermocouples-temperature-ranges-color-codes/>

# Termočlánok (Thermocouple)

Termoelektrické napätie pre jednotlivé druhy termočlánkov

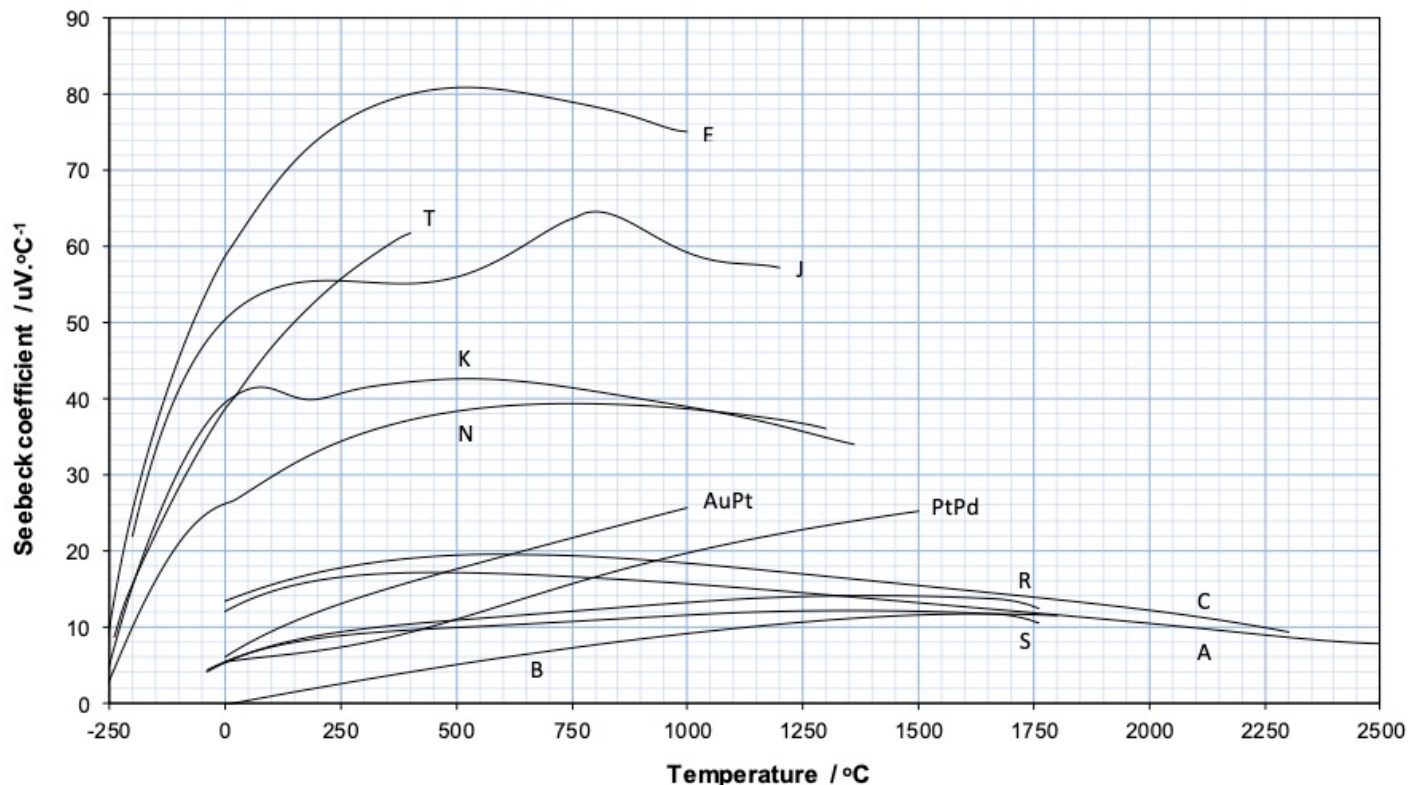
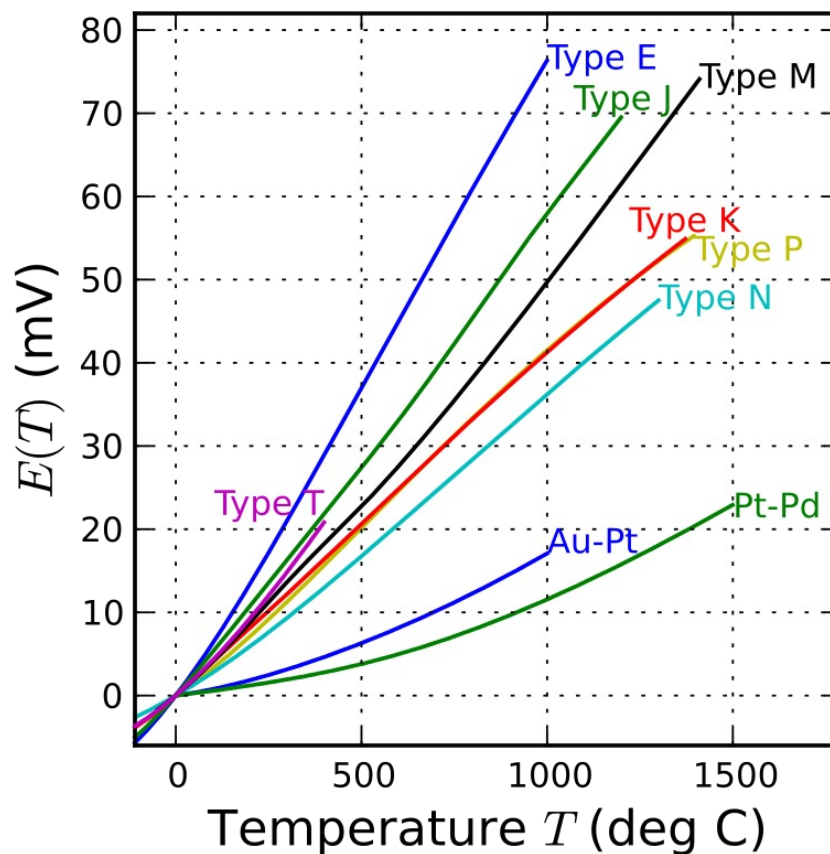
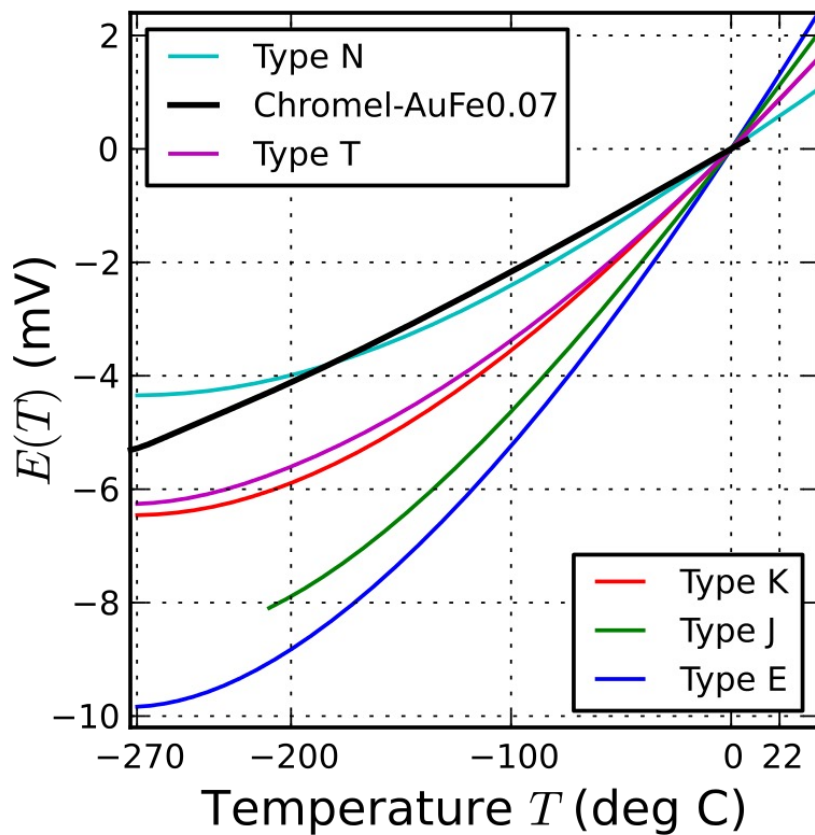


Figure 3. The Seebeck coefficient for common thermocouple types.

# Termočlánok (Thermocouple)

Výstupné napätie v pracovnom rozsahu



# Termočlánok (Thermocouple)

Výstupné napätie ako funkcia teploty. Zdroj NIST ITS-90 Thermocouple Database <https://srdata.nist.gov/its90/main/>

$$E = \sum_{i=0}^n c_i (t_{90})^i$$

$$E = \sum_{i=0}^n c_i (t_{90})^i + a_0 e^{a_1 (t_{90} - a_2)^2}$$

## Type K Thermocouples Coefficients in mV

	-270 °C to 0 °C	0 °C to 1372 °C
$c_0 =$	$0.000000000000 \times 10^0$	$-0.176004136860 \times 10^{-1}$
$c_1 =$	$0.394501280250 \times 10^{-1}$	$0.389212049750 \times 10^{-1}$
$c_2 =$	$0.236223735980 \times 10^{-4}$	$0.185587700320 \times 10^{-4}$
$c_3 =$	$-0.328589067840 \times 10^{-6}$	$-0.994575928740 \times 10^{-7}$
$c_4 =$	$-0.499048287770 \times 10^{-8}$	$0.318409457190 \times 10^{-9}$
$c_5 =$	$-0.675090591730 \times 10^{-10}$	$-0.560728448890 \times 10^{-12}$
$c_6 =$	$-0.574103274280 \times 10^{-12}$	$0.560750590590 \times 10^{-15}$
$c_7 =$	$-0.310888728940 \times 10^{-14}$	$-0.320207200030 \times 10^{-18}$
$c_8 =$	$-0.104516093650 \times 10^{-16}$	$0.971511471520 \times 10^{-22}$
$c_9 =$	$-0.198892668780 \times 10^{-19}$	$-0.121047212750 \times 10^{-25}$
$c_{10} =$	$-0.163226974860 \times 10^{-22}$	
$a_0 =$		$0.118597600000 \times 10^0$
$a_1 =$		$-0.118343200000 \times 10^{-3}$
$a_2 =$		$0.126968600000 \times 10^3$



# Termočlánok (Thermocouple)

Teplota, ako funkcia generovaného napätia. Zdroj NIST ITS-90 Thermocouple Database <https://srdata.nist.gov/its90/main/>

$$t_{90} = d_0 + d_1E + d_2E^2 + \dots d_nE^n$$

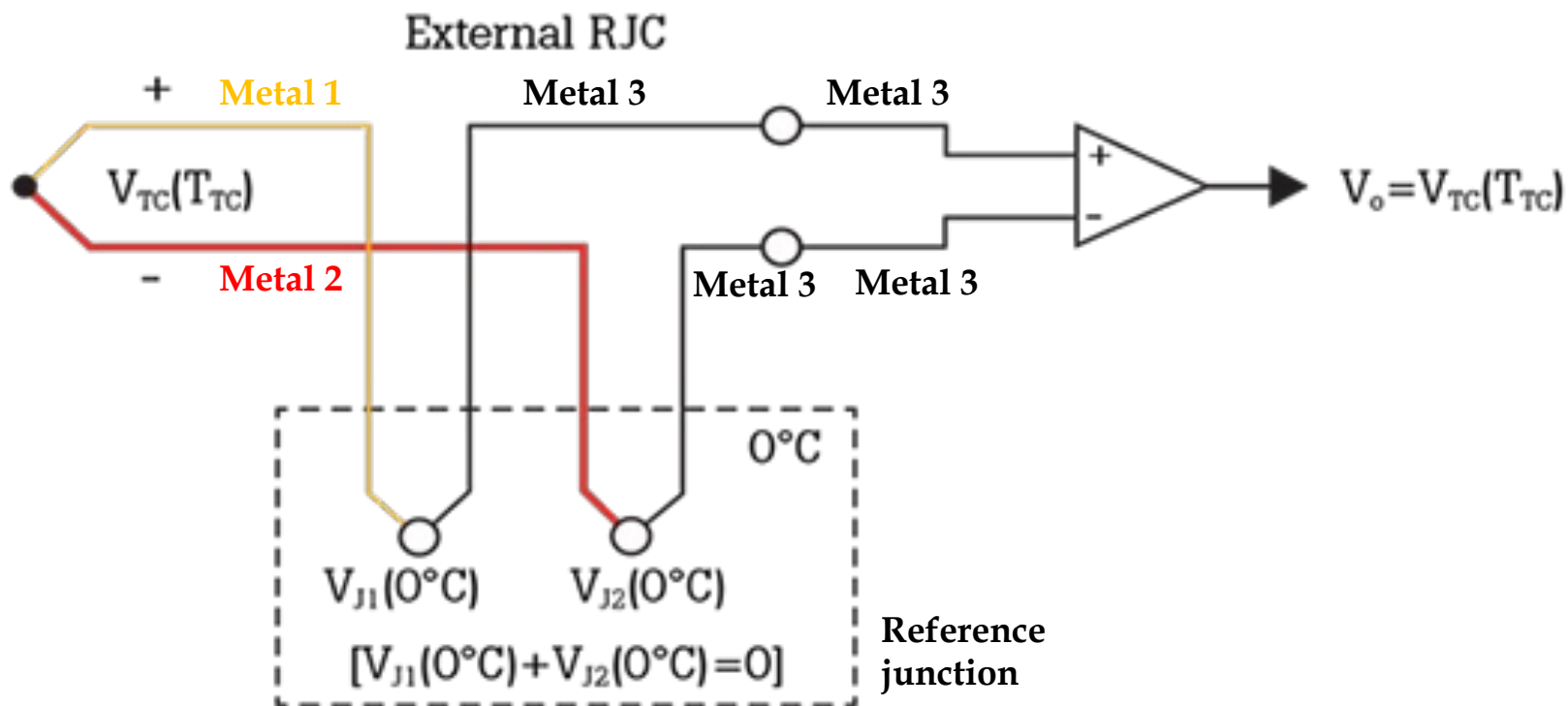
## Type K Thermocouples Coefficients in mV

Temperature Range:	-200 °C to 0 °C	0 °C to 500 °C	500 °C to 1372 °C
Voltage Range:	-5.891 mV to 0 mV	0 mV to 20.644 mV	20.644 mV to 54.886 mV
$d_0 =$	$0.000000 \times 10^0$	$0.000000 \times 10^0$	$-1.318058 \times 10^2$
$d_1 =$	$2.5173462 \times 10^1$	$2.508355 \times 10^1$	$4.830222 \times 10^1$
$d_2 =$	$-1.1662878 \times 10^0$	$7.860106 \times 10^{-2}$	$-1.646031 \times 10^0$
$d_3 =$	$-1.0833638 \times 10^0$	$-2.503131 \times 10^{-1}$	$5.464731 \times 10^{-2}$
$d_4 =$	$-8.9773540 \times 10^{-1}$	$8.315270 \times 10^{-2}$	$-9.650715 \times 10^{-4}$
$d_5 =$	$-3.7342377 \times 10^{-1}$	$-1.228034 \times 10^{-2}$	$8.802193 \times 10^{-6}$
$d_6 =$	$-8.6632643 \times 10^{-2}$	$9.804036 \times 10^{-4}$	$-3.110810 \times 10^{-8}$
$d_7 =$	$-1.0450598 \times 10^{-2}$	$-4.413030 \times 10^{-5}$	
$d_8 =$	$-5.1920577 \times 10^{-4}$	$1.057734 \times 10^{-6}$	
$d_9 =$		$-1.052755 \times 10^{-8}$	
Error Range:	-0.02 °C to 0.04 °C	-0.05 °C to 0.04 °C	-0.05 °C to 0.06 °C



# Termočlánok (Thermocouple)

Termoelektrické napätie zodpovedá rozdielu napätia medzi studeným a teplým koncom.

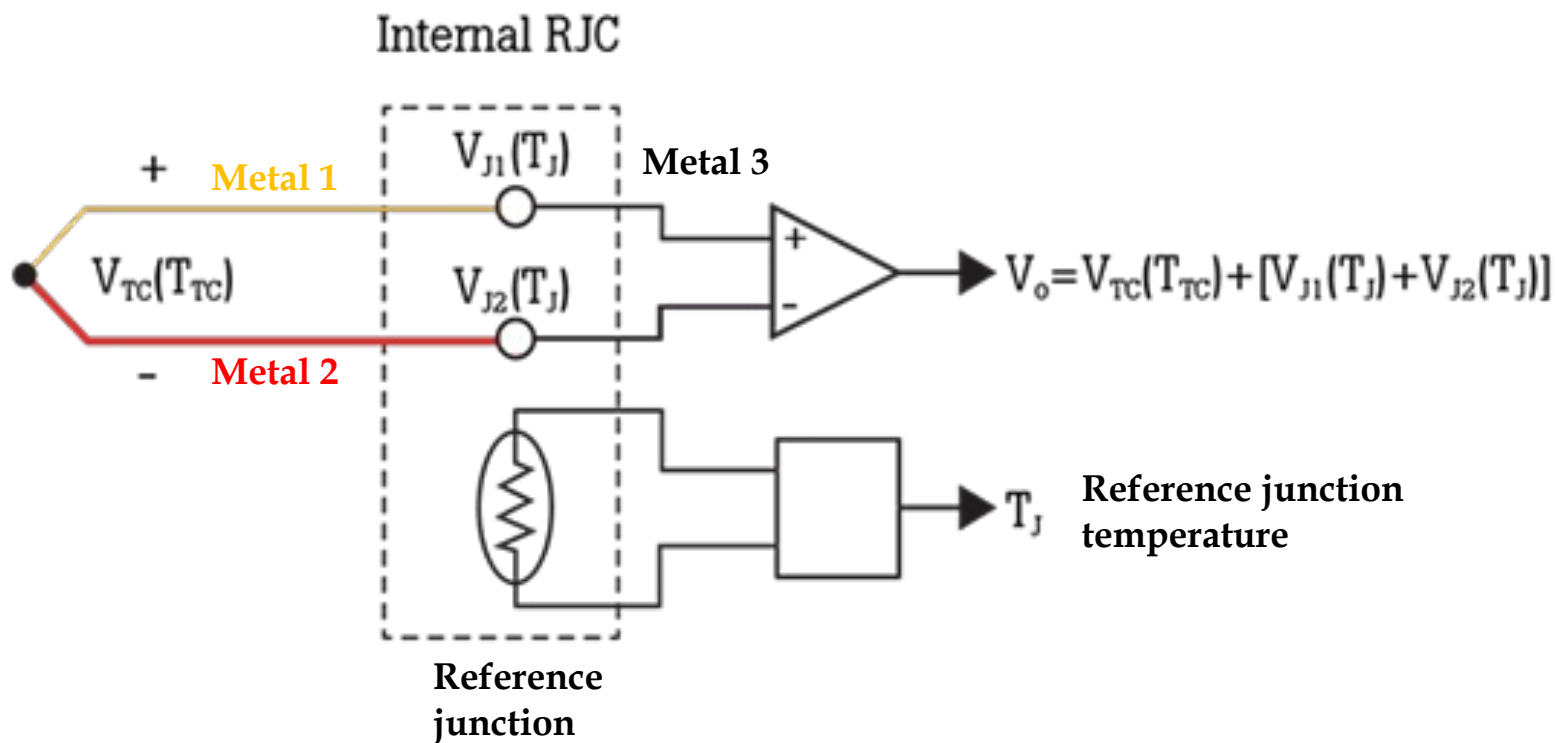


Obrazky: Fluke Calibration application note: How to calibrate a thermocouple



# Termočlánok (Thermocouple)

Termoelektrické napätie zodpovedá rozdielu napätia medzi studeným a teplým koncom.



# Termočlánok (Thermocouple)

Senzory pre elektroniku a priemysel



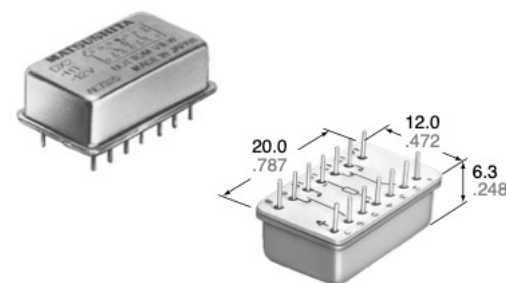
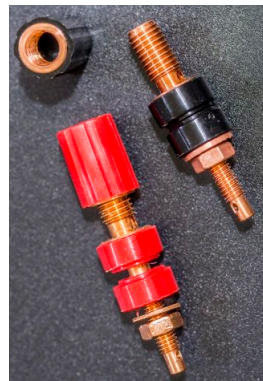
Foto: Labfacility

# Termočlánok (Thermocouple)

Termoelektrické napätie ale vzniká aj kde ho nechceme...

Problém napr. pre veľmi precíznu meráciu techniku

Paired Materials	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ( $Q_{ab}$ )
Copper-Copper	<0.2
Copper-Cadmium/Tin Solder	0.2
Copper-Gold	0.3
Copper-Silver	0.3
Copper-Brass	3
Copper-Lead-Tin Solder	5
Copper-Aluminum	5
Copper-Nickel	10
Copper-Kovar	40
Copper-Copper Oxide	>1000



## SPECIFICATIONS

### Contacts

Arrangement	2 Form C	
Initial contact bounce, max.	1 ms	
Contact pressure	Approx. 6 g .21 oz	
Initial contact resistance, max. (By voltage drop 6 V DC 1 A)	60 m $\Omega$	
Electrostatic capacitance (Contact to contact)	Approx. 1 pF	
Thermal electromotive force (at nominal coil voltage)	Single side stable	35 $\mu\text{V}$
	Latching type	1 $\mu\text{V}$

Foto: Illya Tsemenko



# Termočlánok (Thermocouple)

- + Širší rozsah teplôt, od kryogenických po  $>2500\text{ }^{\circ}\text{C}$
- + Odolnosť
- + Cena
- + Najjednoduchší prijímač je ručičkový millivoltmeter
- +/- Takmer lineárna charakteristika vyžaduje meranie napätia s vysokým rozlíšením
- Meranie veľmi nízkych napätí v zarušenom priemyselnom prostredí
- Pre presné merania nutná referenčná lázeň  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , alebo nutné poznať a udržiavať teplotu studeného konca s vysokou presnosťou

# Termočlánok literatúra

- Bureau International des Poids et Mesures – Guide to Secondary Thermometry. Thermocouple Thermometry: 1. General Usage  
<https://www.bipm.org/en/committees/cc/cct/guides-to-thermometry>
- Guide to Secondary Thermometry. Thermocouple Thermometry: Thermocouple Thermometry: 2. Calibration  
<https://www.bipm.org/en/committees/cc/cct/guides-to-thermometry>
- NIST ITS-90 Thermocouple Database <https://srdata.nist.gov/its90/main/>
- Fluke Calibration application note: How to calibrate a thermocouple  
<https://s3.amazonaws.com/download.flukecal.com/pub/literature/6004550c-how-to-cal-thermocouple-an-w.pdf>
- ELSO Termočlánok - popis, zliatiny a napätie  
<https://www.else.sk/sk/blog/technologie/termoclanok>

# Budený polovodičový priechod

Prúd pretekajúci P-N priechodom je veľmi zložitá funkcia teploty a parametrov polovodiča

Túto závislosť vieme využiť pre meranie teploty

# Budený polovodičový priechod

## PN diode Voltage-Temperature Characteristics

A pn-diode can be used as a thermometer because the saturation current of a diode is temperature dependent. This is convenient for measuring the temperature of a circuit. The current-voltage characteristic of a diode is described by the diode equation,

$$I = I_S \left( \exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right) \quad [\text{A}].$$

Where  $I$  is the current,  $I_S$  is the saturation current,  $e$  is the charge of an electron,  $V$  is the voltage,  $k_B$  is Boltzmann's constant, and  $T$  is the absolute temperature. For a pn-diode, the saturation current can be written as,

$$I_S = A e n_i^2 \left( \frac{D_p}{L_p N_d} + \frac{D_n}{L_n N_a} \right).$$

Here  $A$  is the area of the diode perpendicular to the current flow,  $n_i$  is the intrinsic carrier concentration,  $N_d$  is the donor concentration,  $N_a$  is the acceptor concentration,  $D_n$  is the diffusion constant for electrons,  $D_p$  is the diffusion constant for holes,  $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$  is the diffusion length for electrons,  $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$  is the diffusion constant for holes,  $\tau_n$  is the minority carrier lifetime for electrons, and  $\tau_p$  is the minority carrier lifetime for holes.

The intrinsic carrier density is a strong function of temperature,

$$n_i = \sqrt{N_c \left(\frac{T}{300}\right)^{3/2} N_v \left(\frac{T}{300}\right)^{3/2} \exp\left(\frac{-E_g}{2k_B T}\right)}.$$

Here  $N_c$  is the effective density of states in the conduction band at 300 K,  $N_v$  is the effective density of states in the valence band at 300 K, and  $E_g$  is the band gap. The temperature dependence of the band gap can be input into the form below. The diffusion constants are related to the mobilities by the Einstein relation,

$$D_n = \frac{\mu_n k_B T}{e} \quad D_p = \frac{\mu_p k_B T}{e},$$

[http://lampx.tugraz.at/~hadley/psd/L6/VT\\_I.php](http://lampx.tugraz.at/~hadley/psd/L6/VT_I.php)



# Budený polovodičový priechod

- Dôsledok?

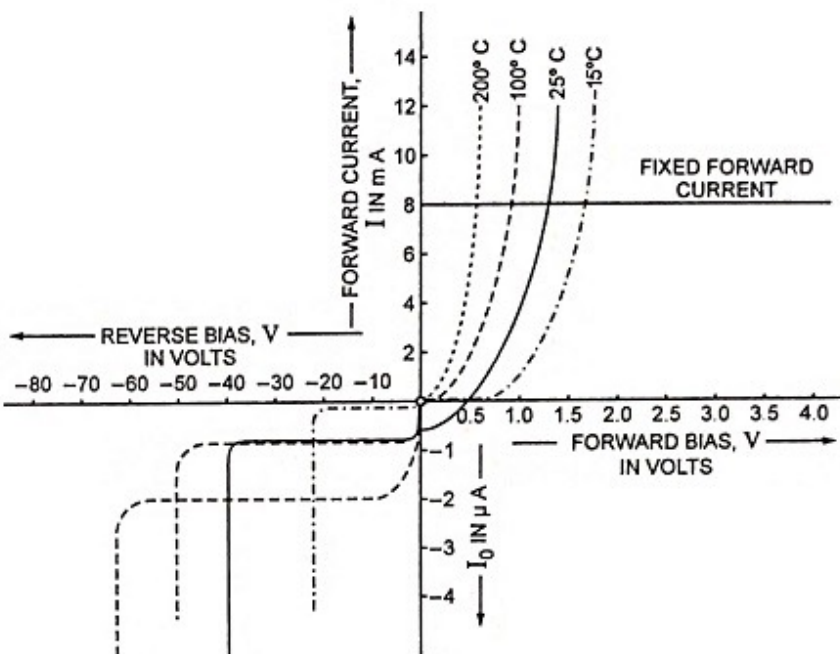


Fig. 7.18 Variation in Diode Characteristics With Variations in Temperature

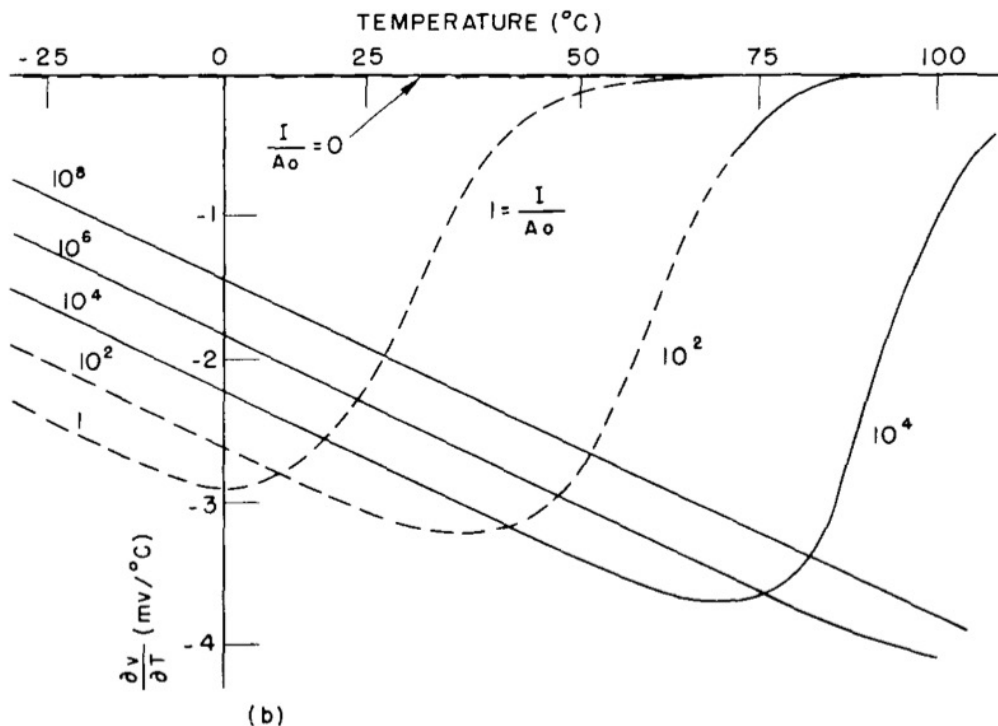
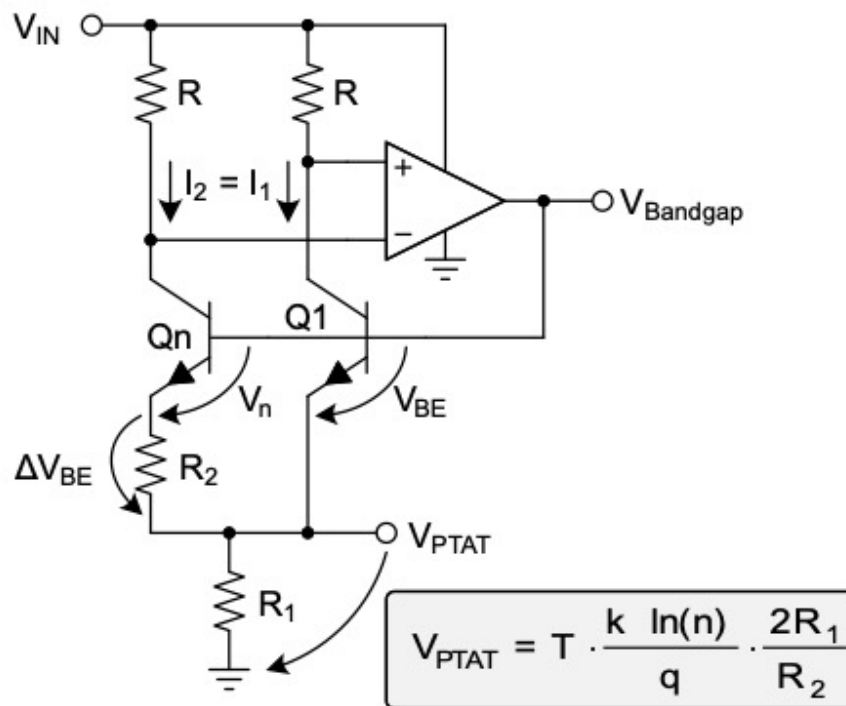


Fig. XI-3. Temperature coefficient of the forward-biased voltage of junction diodes: (a) germanium diodes; (b) silicon diodes.



# Budený polovodičový priechod

- Využitie v praxi – zdroj napätia priamo úmerný absolútnej teplote realizovateľný polovodičovými technológiami na čipe



**Figure 6.  $V_{PTAT}$  Temperature Sensor**

# Budený polovodičový priechod

- + Hotové riešenie vo forme integrovaného obvodu, analógový, alebo digitálny výstup
- + Ľahko realizovateľné na čipe štandardnými technológiami
- + Cena
- + Možná kalibrácia priamo z výroby
- +/- Stredne dobrá presnosť, typ.  $\pm 0,5 \dots \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ , špeciálne  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$
- +/- Nízky rozsah teplôt, typ.  $-40 \text{ }^\circ\text{C} \dots 125 \text{ }^\circ\text{C}$ , špeciálne senzory  $-55 \text{ }^\circ\text{C} \dots 155 \text{ }^\circ\text{C}$

# Polovodičové senzory literatúra

- PHT.301 Physics of Semiconductor Devices: PN diode Voltage-Temperature Characteristics [http://lampx.tugraz.at/~hadley/psd/L6/VT\\_I.php](http://lampx.tugraz.at/~hadley/psd/L6/VT_I.php)
- Lipsky, A. H.; Hurtig, C. R.; Martindale, R. B.; Jackson, W. D.; Nelson, R. E. Transistor and Diode Studies <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/52058>
- Texas Instruments application report SNAA267A Semiconductor Temperature Sensors Challenge Precision RTDs and Thermistors in Building Automation <https://www.ti.com/lit/an/snaa267a/snaa267a.pdf>

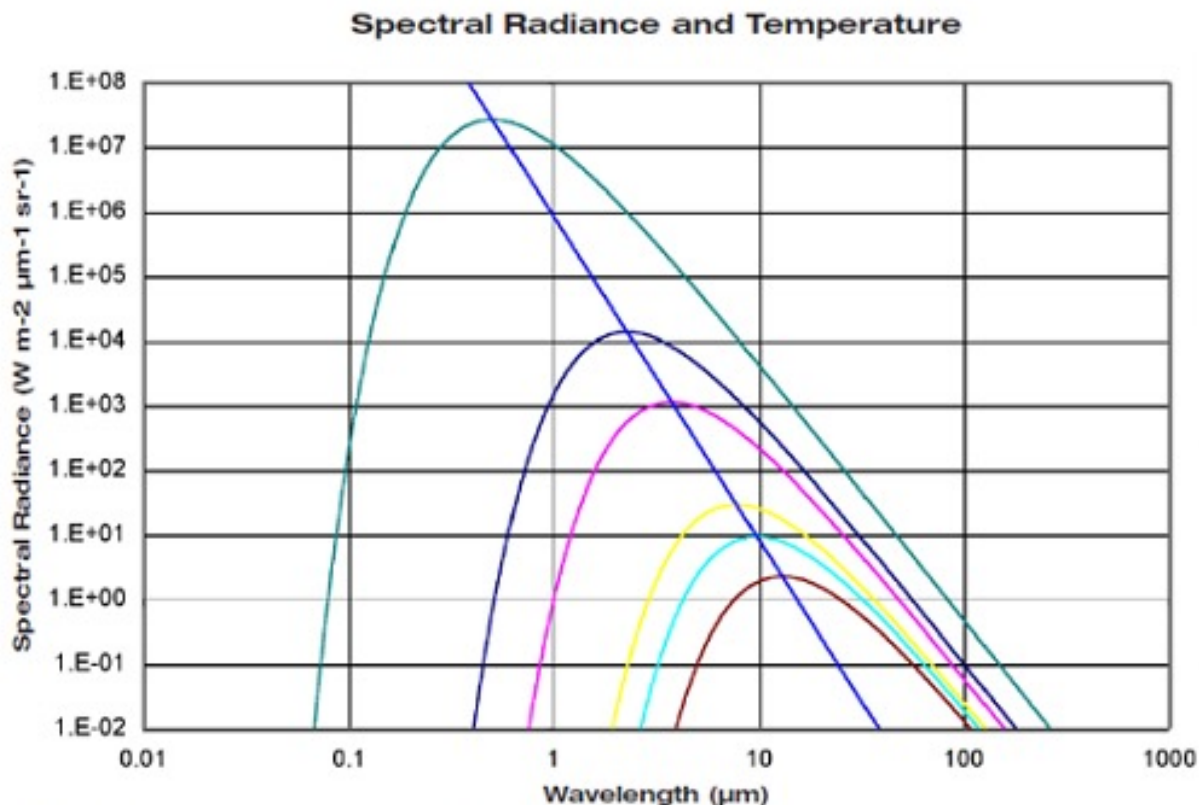
# Detektory elektromagnetického žiarenia

## Žiarenie čierneho telesa

- V 1859 Kirchhoff definoval čierne teleso ako objekt, ktorý je ideálny žiarič, alebo absorbér žiarenia
- Dekáda 1890-1900, experimentálne a teoretické pokusy definovať spektrálnu distribúciu žiarenia – koľko energie sa vyžaruje na akej vlnovej dĺžke ako funkcia teploty
- 1900 Max Planck teoreticky odvodil spektrum vyžarovania zo základných prírodných princípov (Nobelova cena 1918)

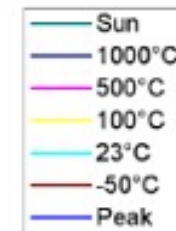
# Detektory elektromagnetického žiarenia

## Žiarenie čierneho telesa



## BLACKBODY RADIATION

$$E(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$



The peak on the graph corresponds to the brightest wavelengths.  
The peak moves to the left and the whole curve moves up as the temperature increases.

# Detektory elektromagnetického žiarenia

Emisivita materiálov: Parameter vyjadrujúci schopnosť objektu vyžiariť elektromagnetickú energiu (teplo)

- Leštený kov 0.0
- Čierne teleso 1.0

$$\varepsilon = \frac{\text{Vyžarovanie z povrchu objektu}}{\text{Vyžarovanie čierneho telesa}}$$

Material	Emissivity Values		
	1.0µm	1.6µm	8-14µm
<b>Aluminum</b>			
Unoxidized	0.1-0.2	0.02-0.2	n.r.
Oxidized	0.4	0.4	0.2-0.4

Material	Emissivity Values			
	1.0 µm	5.0 µm	7.9 µm	8-14 µm
Asbestos	0.9	0.9	0.95	0.95
Asphalt	n.r.	0.9	0.95	0.95
Paint (non-Al.)		0.9-0.95	0.9-0.95	
Paper (any color)	n.r.	0.95	0.95	0.95

# Detektory elektromagnetického žiarenia - literatúra

- This Month in Physics History: October 1900: Planck's Formula for Black Body Radiation <https://www.aps.org/publications/apsnews/200210/history.cfm>
- Emissivity Values for Metals <https://www.flukeprocessinstruments.com/en-us/service-and-support/knowledge-center/infrared-technology/emissivity-metals>
- Emissivity Values for Common Materials <https://www.flukeprocessinstruments.com/en-us/why-use-pyrometers%3F-0>

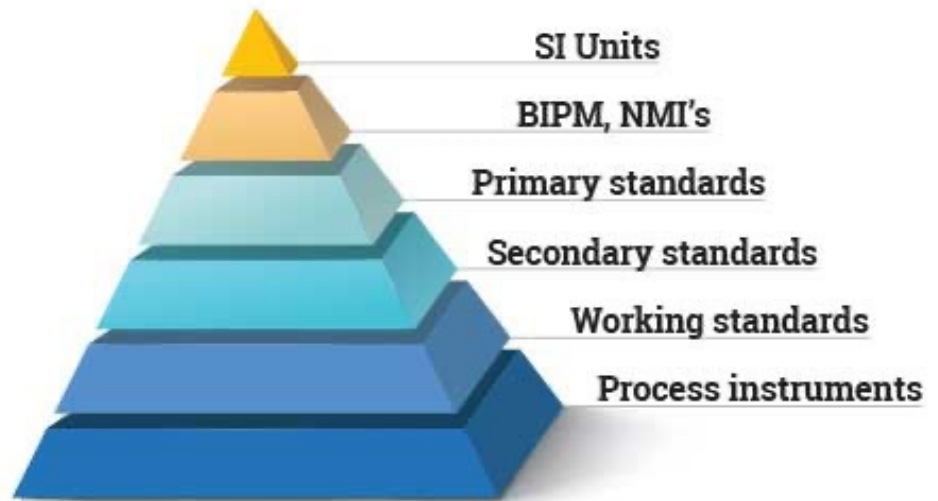
# Kalibrácia

**Kalibrácia** (calibration) je akt porovnávania testovaného zariadenia (DUT) neznámej hodnoty s referenčným štandardom známej hodnoty.

Kalibrácia sa zvyčajne vykonáva, aby určila chybu merania alebo overila presnosť neznámej hodnoty DUT.

**Justovanie** (adjustment)

?





# Kalibrácia

1. Kalibrácia porovnaním merania DUT s meraním kalibrovaného referenčného štandardu, alebo voči zdroju známej hodnoty definovanom základnými prírodnými konštantami – primárne etalóny (napr. kvantové javy, trojný bod vody, tuhnutie materiálu).
2. Kalibrácia porovnaním so zdrojom známej hodnoty – sekundárne, prevádzkové etalóny. Napr. meranie hodnoty kalibrovaného referenčného štandardného rezistora kalibrovaný ohmmetrom. Referenčný rezistor poskytuje známu hodnotu ohmu, naviazanú na primárny etalon.

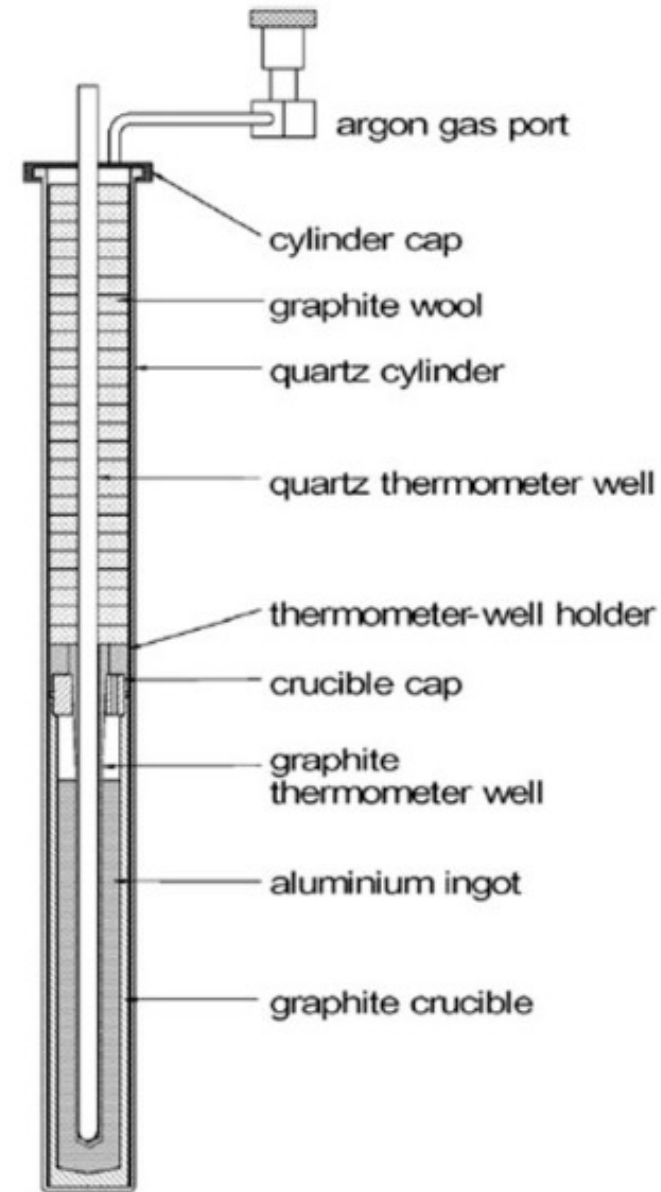
# Kalibrácia teploty – zdroje známej teploty

1. Zdroj teploty na základe definície:
  - Bod tavenia, alebo tuhnutia vybraných látok – “Definičný pevný bod” (Fixed point cell) (Hg, Ga, In, Sn, Zn, Al, Ag, Au, Cu)
  - Trojný bod kvapalín a plynov ( $\text{H}_2\text{O}$ , Ar,  $\text{O}_2$ , Ne,  $\text{H}_2$ )
2. Zdroj konštantnej teploty + referenčný teplomer
  - Kalibračné lázne
  - Kalibračné vaničky
  - Kalibračné piecky
  - Čierne teleso

# Kalibrácia teploty - zdroje známej teploty

Bod tavenia, alebo tuhnutia vybraných látok - "Definičný pevný bod" (Fixed point cell) (Hg, Ga, In, Sn, Zn, Al, Ag, Au, Cu)

Substance	Assigned value of temperature $t_{90} / ^\circ\text{C}$	
Mercury (tp)	-38.8344	
Gallium	29.7646	
Indium	156.5985	
Tin	231.928	
Zinc	419.527	
Aluminium	660.323	Gold 1064.18 °C
Silver	961.78	Copper 1084.62 °C



# Kalibrácia teploty – zdroje teploty

“Definičný pevný bod” (Fixed point cell)



# Kalibrácia teploty – zdroje známej teploty

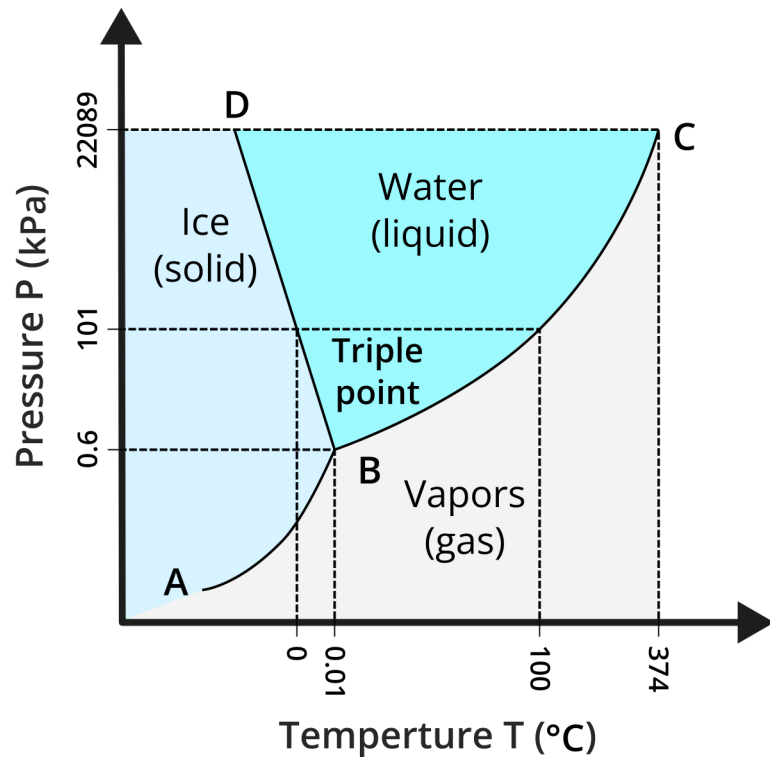
Trojný bod kvapalín a plynov ( $\text{H}_2\text{O}$ , Ar,  $\text{O}_2$ , Ne,  $\text{H}_2$ )

Substance	Hydrogen	Neon	Oxygen	Argon
$T_{90} / \text{K}$	13.8033	24.5561	54.3584	83.8058
$p / \text{kPa}$	7.034	43.379	0.1464	68.892
$Q_{\text{HF}} / (\text{J} / \text{mol})$	117	335	444	1188
$Q_{\text{HF}} / c_{\text{Cu}}$	90	33	4.4	6
$A / \text{K}^{-1}$	0.0739	0.0668	0.0181	0.0203
$A^{-1} / (\mu\text{K} / 10^{-6} \text{ mole frac})$	14	15	55	49
$dT_{90}/dp (10^{-8} \text{ K} / \text{Pa})$	34	16	12	25
$dT_{90}/dl (10^{-3} \text{ K} / \text{m})$	0.25	1.9	1.5	3.3
$\lambda_l / (\text{W} / (\text{Km}))$	0.103	0.117	0.196	0.125
$\rho_l (\text{g} / \text{L})$	71	1206	1141	1392
$\rho_s (\text{g} / \text{L})$	87	1444	1351	1623
$c_s (\text{J} / (\text{K mol}))$	6.2	24.3	46	33.2



# Kalibrácia teploty - zdroje známej teploty

Trojný bod vody: 0,01 °C



## Isotopic composition of the cell water

Natural water is a mixture of four main isotopologues:  $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ ,  $^1\text{H}_2^{17}\text{O}$ ,  $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$  and  $^2\text{H}^1\text{H}^{16}\text{O}$ . The *Mise en Pratique for the definition of the kelvin*, MeP-K [BIPM 2011] requires the water in the TPW cell to have the isotopic composition:

0.00015576 mole of  $^2\text{H}$  per mole of  $^1\text{H}$ ,

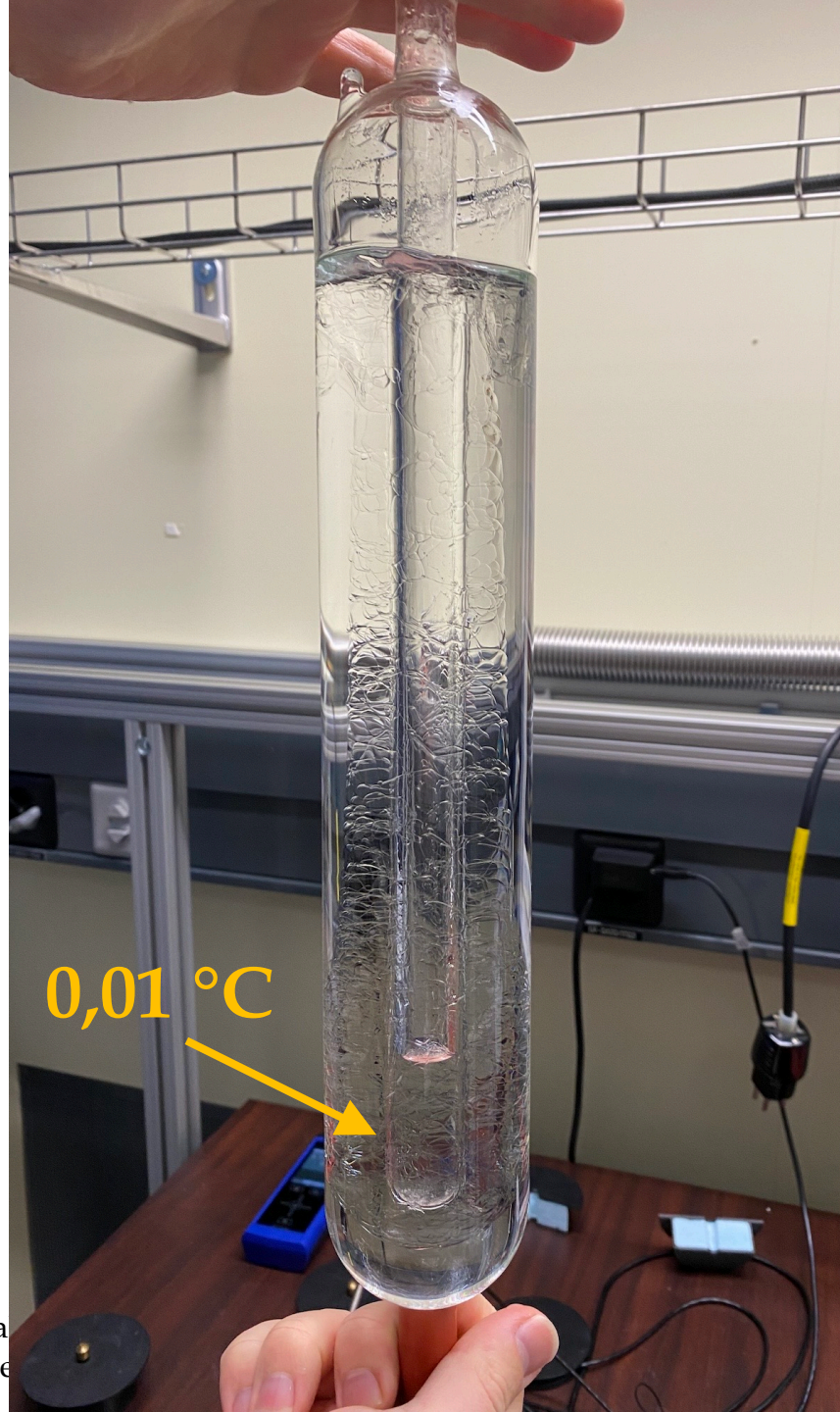
0.0003799 mole of  $^{17}\text{O}$  per mole of  $^{16}\text{O}$ , and

0.0020052 mole of  $^{18}\text{O}$  per mole of  $^{16}\text{O}$ ,

which are the amount-of-substance ratios of Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW), based on the best measurement available [De Laeter *et al.* 2003].

<https://psiberg.com/triple-point/>

# Kalibrácia teploty - zdroje známej teploty



# Kalibrácia teploty - zdroje známej teploty

2. Zdroj konštantnej teploty + referenčný teplomer
  - Kalibračné lázne
  - Kalibračné vaničky





# Kalibrácia teploty – zdroje známej teploty

2. Zdroj konštantnej teploty + referenčný teplomer
  - Kalibračné pecky
  - Čierne teleso



# Kalibrácia teploty – literatúra

- de Wijs, Gilles A. and Kresse, Georg and Gillan, Michael J.: First-order phase transitions by first-principles free-energy calculations: The melting of Al DOI 10.1103/PhysRevB.57.8223
- CCT Guidebooks: Guides to Thermometry  
<https://www.bipm.org/en/committees/cc/cct/guides-to-thermometry>



Ďakujem za pozornosť

