

SZENZOROK ALKALMAZÁSOKBAN

TERMIKUS ÉRZÉKELŐK ÉS ALKALMAZÁSAIK

Géczy Attila gattila@ett.bme.hu

Utoljára módosítva: 2017.12.06.

Ajánlott irodalom, források:

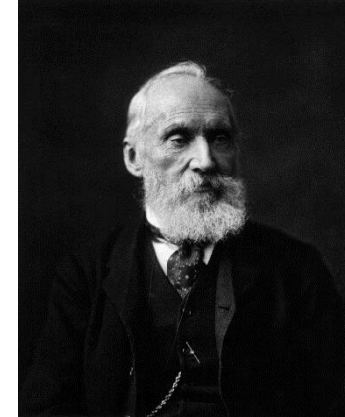
- Robert P. Benedict. *Fundamentals of Temperature, Pressure, and Flow Measurements, Third Edition*
- WIKA Handbook, *Pressure & Temperature Measurement, 2008*
- www.tcdirect.com



A HŐMÉRSÉKLET TERMODINAMIKUS LEÍRÁSA

Kelvin (1848) Carnot motor elemzéséből vezeti le az abszolút hőmérsékleti skálát.

Termodinamikai hőmérséklet: abszolút leírása a hőmérsékletnek – legalacsonyabb hőmérséklet a nulla (zéró pont, ahol az anyag nem tud hidegebb lenni, legalacsonyabb energiaállapot).

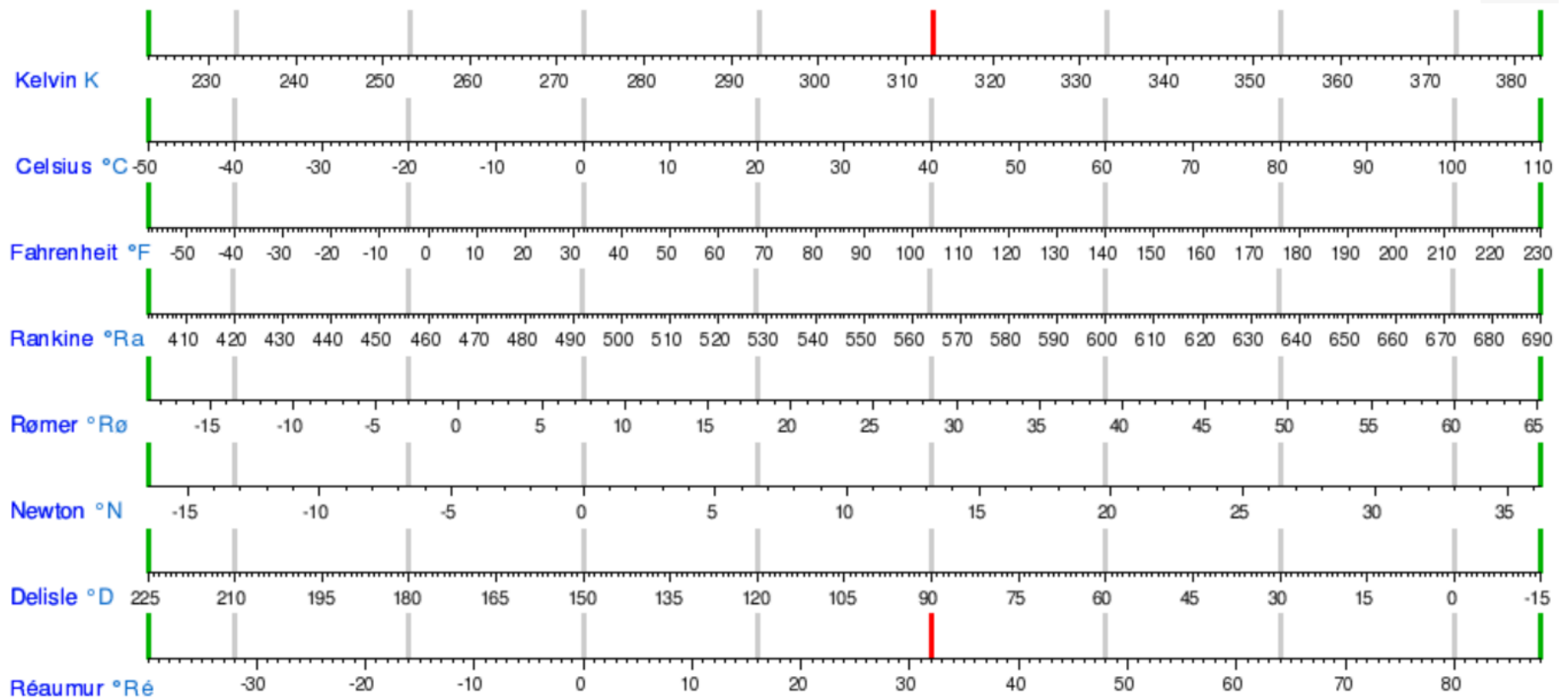


Abszolút skála fix vonatkoztatási pontja: víz hármaspontja (hármaspontban egyensúlyi viszonyok között mindhárom fázis stabil): **273,16 K**.

Rankine skála: termodinamikus abszolút skála Fahrenheit mértékegységgel.

ITS-90 - International Temperature Scale (1990. Jan. 1.): 0,65 K-től a Planck hőmérsékleti sugárzási törvényének korlátaival mérhető hőmérsékletig terjed. 17 nevezetes pont, szabványosított termodinamikai skála – pontos gyakorlati közelítésekre.

KONVERZIÓS TÁBLA



313.15 K = 40 °C = 104 °F = 563.67 °Ra = 28.5 °Rø = 13.2 °N = 90 °D = 32 °Ré

HŐMÉRSÉKLETI SKÁLÁK KÖZÖTTI VÁLTÁS

$$1 K \triangleq 1 ^\circ C = \frac{9}{5} ^\circ F$$

Celsius (t_C), Kelvin (T_K), Fahrenheit (t_F) és Rankine skálák (T_R) közötti váltások számítása (1)-(4) képletek segítségével.

$$(1) \quad T_k = 273.15 + t_C = \frac{5}{9} \cdot T_R$$

$$(2) \quad t_c = \frac{5}{9} (t_F - 32) = T_K - 273.15$$

$$(3) \quad T_R = 459.67 + t_F = 1.8 \cdot T_K$$

$$(4) \quad t_F = 1.8 \cdot t_C + 32 = T_R - 459.67$$

HŐELEMEK – SEEBECK EFFEKTUS

Termoelektromos hatás: elektromos mező keletkezik egy vezető meleg és hideg vége között, ha a vezető gradienssel rendelkező termikus mezőben található.

$$U = \int_{T_1}^{T_2} S(T) dT$$

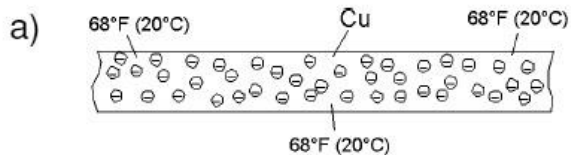
ahol: U – potenciálkülönbség, T_1 , T_2 a vezető két végpontjának hőmérséklete, S – Seebeck koefficiens

Két különböző vezető, közös melegpont:

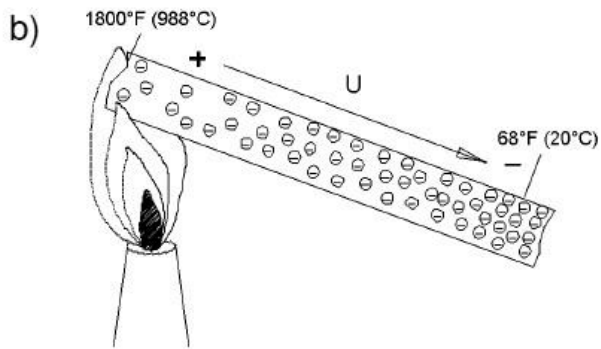
$$U = \int_{T_1}^{T_2} S_A(T) - S_B(T) dT$$

Számolni kell a Seebeck effektus nemlinearitásával!

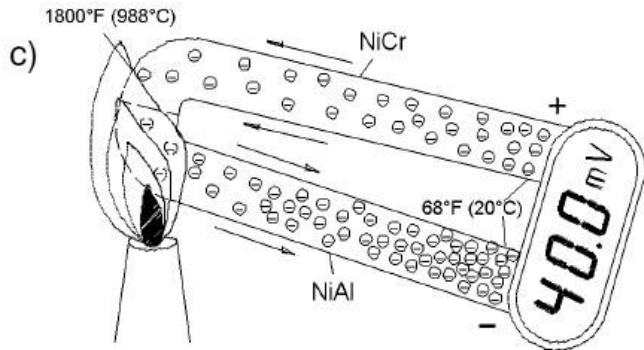
HŐELEMEK – SEEBECK EFFEKTUS



Homogén hőmérsékleteloszlás



Melegített vég: ritkább elektronsűrűség
Hideg vég: nagyobb elektronsűrűség
(alacsonyabb energiaszinten)



Két különböző vezető – NiAl vezetőkön könnyebben mozognak az elektronok, mint a NiCr vezetőkön. -> Potenciálkülönbség a végek között.

HŐELEMEK – K TÍPUSÚ



K típusú hőelem

(Nickel-Chromium / Nickel-Alumel - krómnikkel/nikkel-alumel, másképpen chromel-alumel)

Leggyakoribb termoelem típus.

Olcsó, pontos, megbízható, széles hőmérséklettartományon használják.

(a lenti hőmérséklettartományok gyártófüggő, közelítő paraméterek)

Hőmérséklettartomány: -250-től ~1300 °C-ig



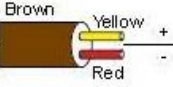
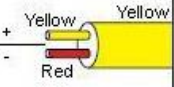
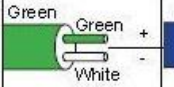
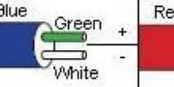
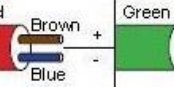

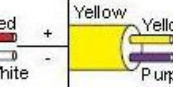
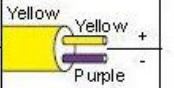








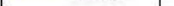
Hosszabbítókábel: 0-tól 200 °C-ig

Pontosság:

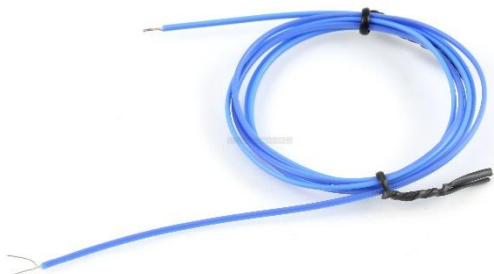
Standard: ± 2.2 °C vagy $\pm .75\%$

Speciális: ± 1 °C vagy $\pm 0.4\%$



THERMO-COUPLE TYPE		U.S. & CANADIAN (ANSI/MC96.1, ANSI/ASTM E230)			International	International	Czech British	Netherlands German	Japanese	French
	ALLOY COMBINATION	THERMOCOUPLE GRADE	EXTENSION GRADE	PLUG & JACK	IEC 584-3	IEC 584-3 <i>Intrinsically Safe</i>	BS 1843	DIN 43710	JIS C 1610	NFC 42-324
K	Nickel - Chromium			Yellow						
	Nickel - Aluminium <i>(magnetic)</i>									

HŐELEMOK – T TÍPUSÚ



T típusú hőelem (Réz/Konstantán)

Kiemelkedő stabilitás.

Nedves közegben vagy extrém alacsony hőmérsékleti körülmények között is használható. (vegyészet, biológia, kriogenika)

Remek ismételhetőséggel bír

Hőmérséklettartomány: -270-től 1260 °C-ig

Hosszabbítókábel: 0-tól 200 °C-ig

Pontosság:

Standard: ± 1 °C vagy $\pm .75\%$

Speciális: ± 0.5 °C vagy $\pm 0.4\%$

THERMO-COUPLE TYPE		U.S. & CANADIAN (ANSI/MC96.1, ANSI/ASTM E230)			International	International	Czech British	Netherlands German	Japanese	French
	ALLOY COMBINATION	THERMOCOUPLE GRADE	EXTENSION GRADE	PLUG & JACK	IEC 584-3	IEC 584-3 <i>Intrinsically Safe</i>	BS 1843	DIN 43710	JIS C 1610	NFC 42-324
T	Copper Constantan (Copper-Nickel)	Brown Blue + Red	Blue Blue + Red	Blue •	Brown Brown + White	Blue Brown + White	Blue White + Blue	Brown Red + Brown	Brown Red + White	Blue Yellow + Blue

HŐELEM – J TÍPUSÚ



J típusú hőelem (Vas/Konstantán)

Gyakori alkalmazás.

Szűkebb hőmérsékleti tartománya van, és alacsonyabb az élettartama mint a K típusúnál.

Ára és megbízhatósága a K-típusúhoz hasonlít.

Alacsonyabb hőmérsékletre annyira nem ajánlott.



Hőmérséklettartomány: -210-től 760 °C-ig

Hosszabbítókábel: 0-tól 200 °C-ig

Pontosság:

Standard: ± 2.2 °C vagy $\pm .75\%$

Speciális: ± 1.1 °C vagy $\pm 0.4\%$

THERMO-COUPLE TYPE	 U.S. & CANADIAN (ANSI/MC96.1, ANSI/ASTM E230)		International	International	Czech British	Netherlands German	Japanese	French		
	ALLOY COMBINATION	THERMOCOUPLE GRADE	EXTENSION GRADE	PLUG & JACK	IEC 584-3	IEC 584-3 Intrinsicly Safe	BS 1843	DIN 43710	JIS C 1610	NFC 42-324
J	Iron (magnetic) Constantan (Copper-Nickel)	Brown White + Red -	White Black + Red -	Black	Black Black + White -	Blue Black + White -	Black Yellow + Blue -	Blue Red + Blue -	Yellow Red + White -	Black Yellow + Black -

HŐELEMOK – TÍPUSOK ÖSSZEFOGLALÁSA

Forrás: mosaic-industries.com

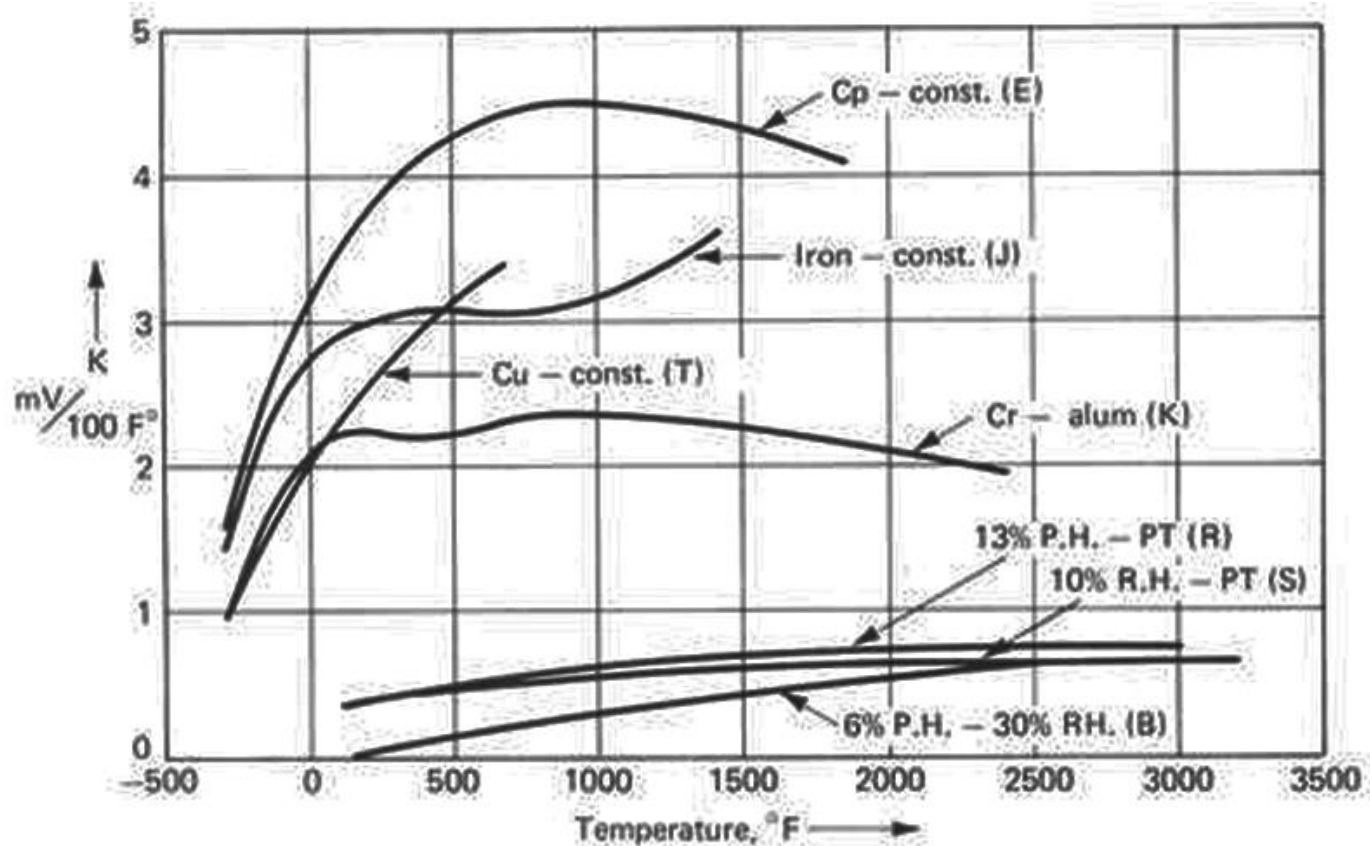
Típus	Összetétel	Érzékenység	Hőmérséklet tartomány
<u>B</u>	(+) Platinum - 30% Rhodium (-) Platinum - 6% Rhodium	5 - 10 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	+250 - +1820 $^\circ\text{C}$
<u>E</u>	(+) Chromel (Ni-Cr) (-) Constantan (Cu-Ni)	40 - 80 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	-270 - +1000 $^\circ\text{C}$
<u>J</u>	(+) Iron (-) Constantan (Cu-Ni)	50 - 60 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	-210 - +1200 $^\circ\text{C}$
<u>K</u>	(+) Chromel (Ni-Cr) (-) Alumel (Ni-Al)	28 - 42 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	-250 - +1300 $^\circ\text{C}$
<u>N</u>	(+) Nicrosil (Ni-Cr-Si) (-) Nisil (Ni-Si-Mg)	24 - 38 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	-250 - +1300 $^\circ\text{C}$
<u>R</u>	(+) Platinum (-) Platinum - 13% Rhodium	8 - 14 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	-50 - +1768 $^\circ\text{C}$
<u>S</u>	(+) Platinum (-) Platinum - 10% Rhodium	8 - 12 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	-50 - +1768 $^\circ\text{C}$
<u>T</u>	(+) Copper (-) Constantan (Cu-Ni)	17 - 58 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	-250 - +400 $^\circ\text{C}$

HŐELEMEK – SZÍNTÁBLÁZAT

	United States Color Codes  ANSI MC96.1 1982		IEC 60584-3 Color Coding 		Redundant national color coding for Insulation of thermocouple cables			
	Thermocouple Grade	Extension Grade	Thermocouple Grade	Intrinsically Safe	British to BS1843	German to DIN 13711	French to NFC 42324	Japanese to JIS C 1610-1981
								
Type K Thermocouple	KK 	KX 						
Type T Thermocouple	TT 	TX 						
Type J Thermocouple	JJ 	JX 						
Type N Thermocouple	NN 	NX 						
Type E Thermocouple	EE 	EX 						
Type S Thermocouple	None Established	SX 						
Type R Thermocouple	None Established	RX 						
Type B Thermocouple	None Established	BX 						

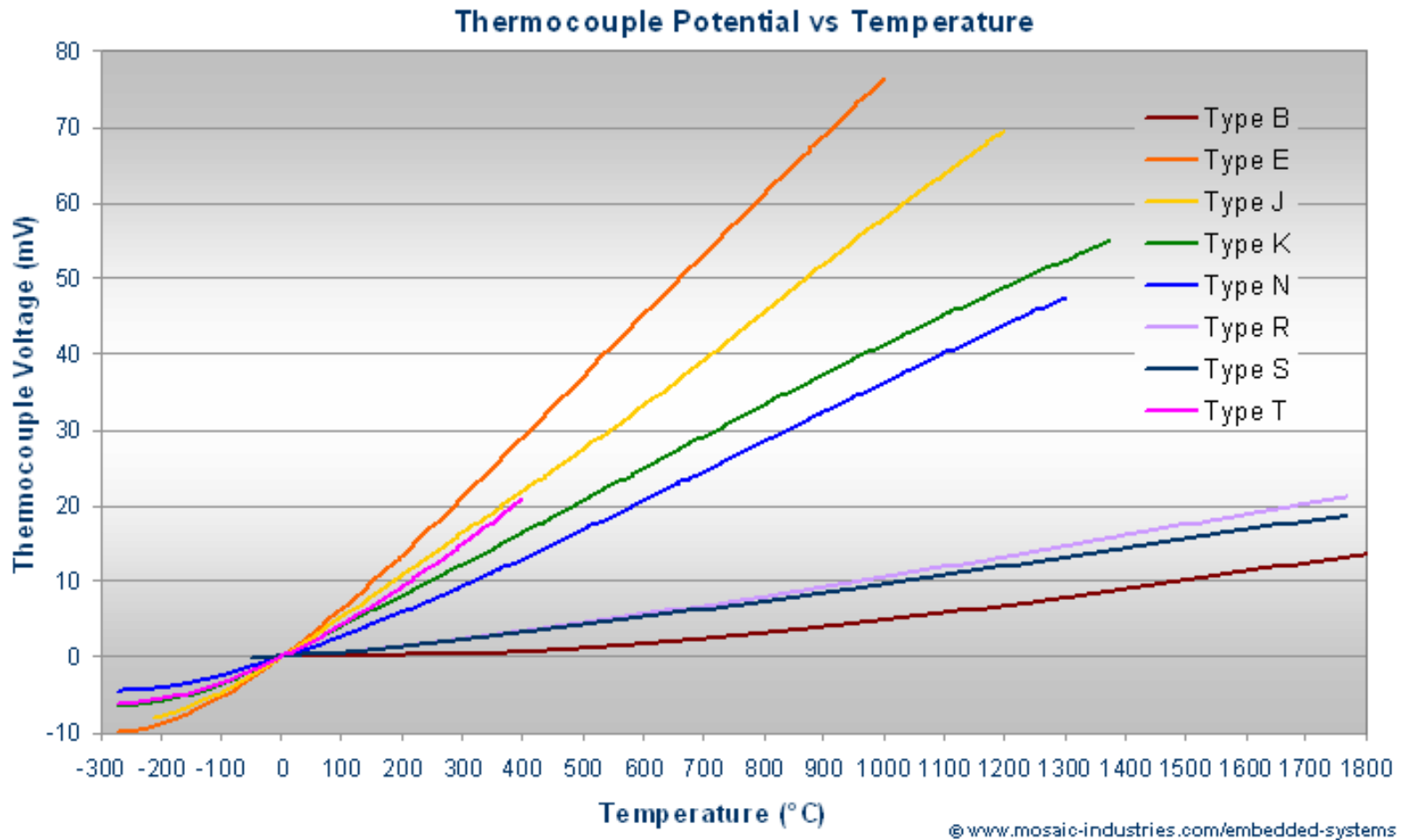
Forrás: reoterm.com

HŐELEMEK – NEMLINEARITÁS

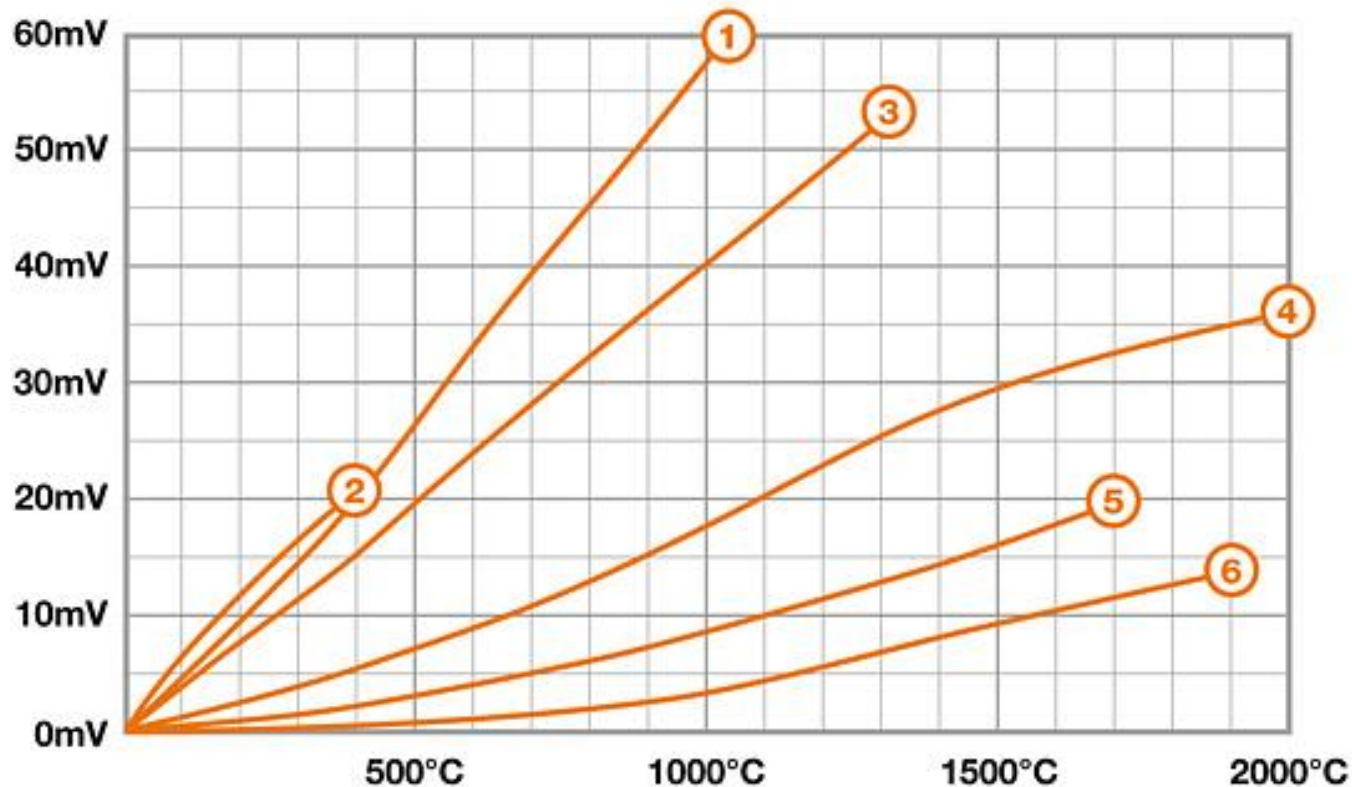


Fischer and Porter, Technical Information Bulletin: "Guide to Thermocouple Temperature Measurement," May 1973.

HŐELEMEK – NEMLINEARITÁS



HŐELEMEK - NEMLINEARITÁS



① Fe-CuNi

② Cu-CuNi

③ Ni-CrNi

④ WRe3%-WRe25%

⑤ Pt-RhPt

⑥ PtRh30%-PtRh6%

Günther GmbH

HŐELEMENK – NEMLINEARITÁS

A K és J-típusú termoelemek népszerűségének egyik oka, hogy esetükben egy széles hőmérséklet-tartományon **közel lineárisnak mondható** a Seebeck-együttható. A K-típus esetében ez a lineárisan jól közelíthető tartomány nagyjából 1000 °C-os.

Egy másik módszer, ha a memóriában tároljuk minden termoelem esetében a különböző hőmérsékletekhez tartozó feszültségértékeket. Ha a **táblázatban** tárolt felbontás nem elegendően nagy, akkor a két legközelebbi érték között lineáris interpolációval kaphatunk újabb értékeket. A táblázatos megoldás jobb közelítést ad, mint az előző és a hőelem teljes működési tartományában használható.

A harmadik és egyben legpontosabb megoldás, ha hőmérséklet-feszültség viszonyt **magasabb fokú egyenletekkel** modellezzük. Ez típustól függően ötöd- vagy kilencedfokú egyenletet is jelenthet, emiatt ez a megoldás bizonyul a leginkább számításigényesnek.

HŐELEMEK - TÍPUSOK

Általában 2-5m hosszú kábellel.



PFA szigetelésű



Üvegszál szigetelésű



PTFE szigetelésű

- Hegesztett melegpont
- Perfluoroalkoxy borítás
- Alacsonyabb °C (-75 – 250°C)
- 0.2 mm vezetékátmérő

- Hegesztett melegpont
- Megemelkedett hőmérsékletbírás (-10°C-400°C)
- 0.2 mm vezetékátmérő

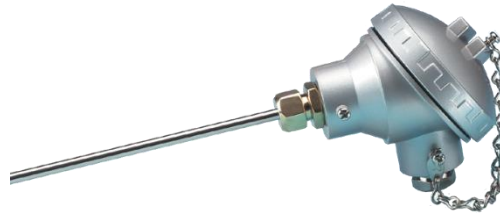
- Hegesztett melegpont
- Teflon (politetrafluoretilén) borítás
- Gáz, gőz, víz elleni védelem
- Tartomány: (-75 – 250°C)
- 0.2 mm vezetékátmérő

Növekvő ár (\$\$\$)

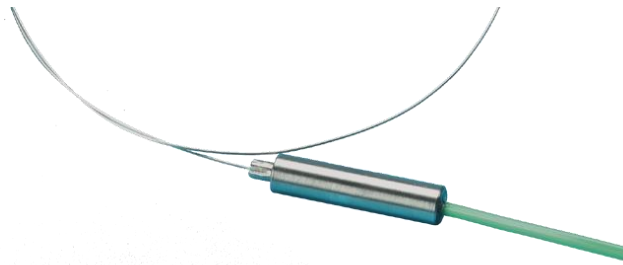
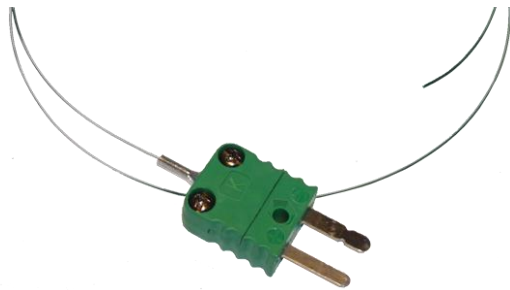
HŐELEMOK - TÍPUSOK



KÖPENYHŐELEM (vízálló fej)



KÖPENYHŐELEM (krimpelt persely)



MINI HŐELEM TÍPUSOK

Védettség IP67
szabvány szerint
IP (international
protection marking)
0...6 – porállóság
0...7..9 – vízállóság (7-
es érték: 1m 30 perc)

- Hajlítható
(könnyebb
behelyezés)
- Kis hőkapacitás,
gyors beállítás

HŐELEMÉK – SPECIÁLIS TÍPUSOK



ALÁTÉT (-10 – 400 °C)



ABA-BILINCS (-100 - 400°C)



CSAVAR (-30-250°C)



KERÁMIACSŐ (akár 1000 °C
feletti tartományokban is)

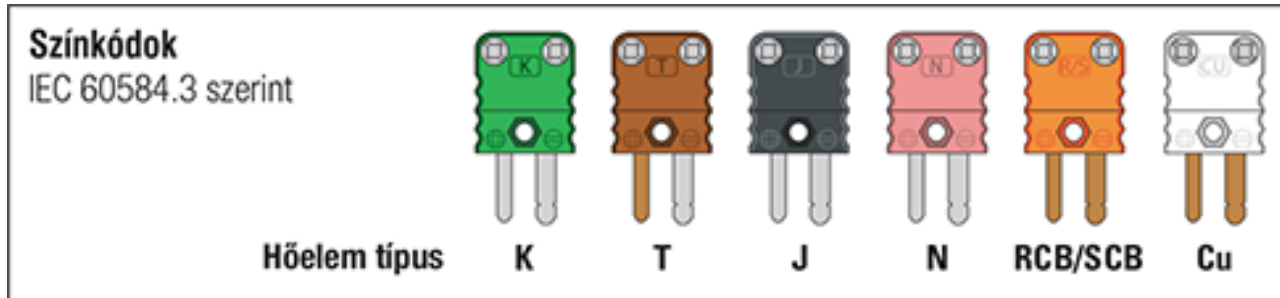


HŐÁLLÓ MÁGNES
(-10 °C – 300 °C)



NAGY TEHERBÍRÁSÚ
MÁGNESES (-10 °C – 100 °C);
6 kg mágneses tartóerő

HŐELEMEK – CSATLAKOZÓK



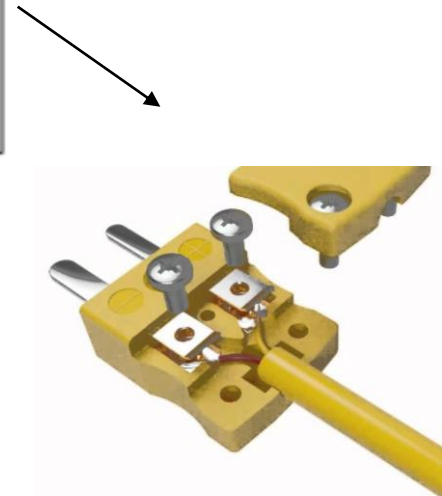
Csatlakozó típusokhoz rendelt színkódok



Mini-csatlakozók (lapos)

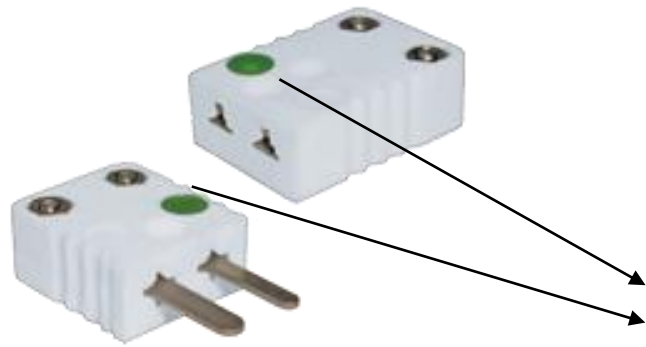


Mini-csatlakozók (hengeres lábú-villás pár)



Csavaros rögzítés

HŐELEMENK – SPECIÁLIS CSATLAKOZÓK



Hőálló csatlakozó

Az alap csatlakozók hőtűrését (~200°C) kiterjeszti ~650°C-ra!

Színkód jelölések (pl nemzetközi szabványok alapján)
IEC 584.3:1989/ BS 4973 Part 30:1993
(BS EN 60584.3)



Duplex



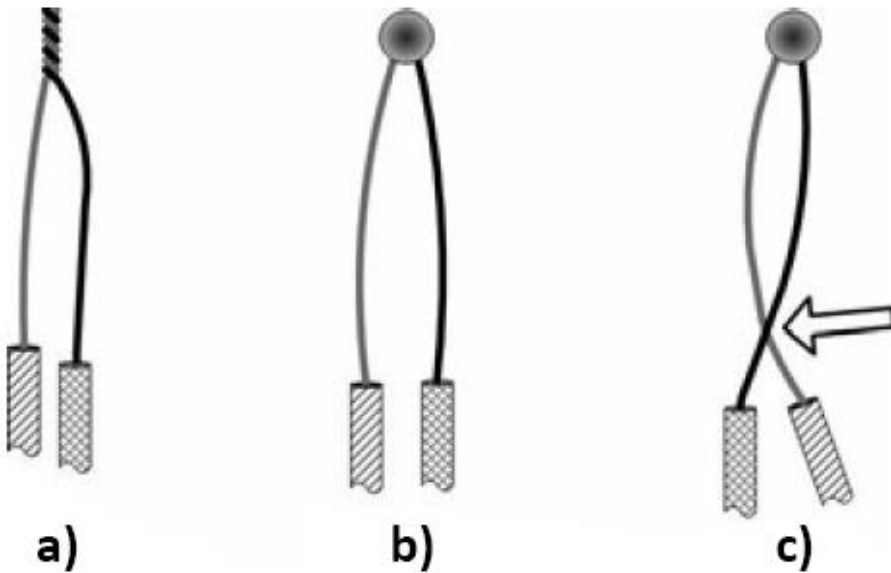
Paneles



Modulrendszerű (egyidejű csatlakoztatás)

HŐELEMENK – MELEGPONT TECHNIKÁK

Clyde F. Coombs: Jr.: Printed Circuits Handbook

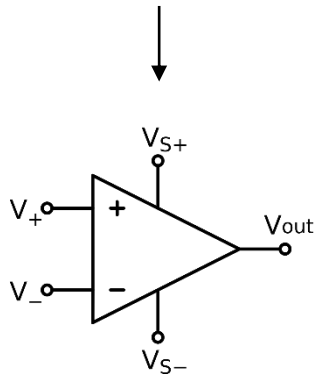


Melegpont: a) csavarrással, b) hegesztéssel, c) összeérő vezetékek, mérési hibát okoz

HŐELEMEK – DIREKT ILLESZTÉS

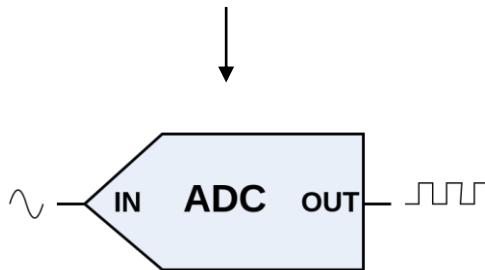


Probléma: kimenetén Seebeck feszültségkülönbség
(K típusú hőelemnél: $41\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)

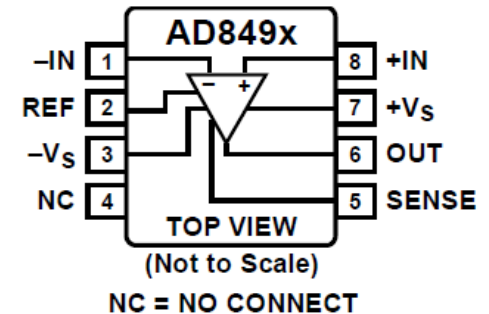


Megoldás: erősítő alkalmazása.
Például AD849x.

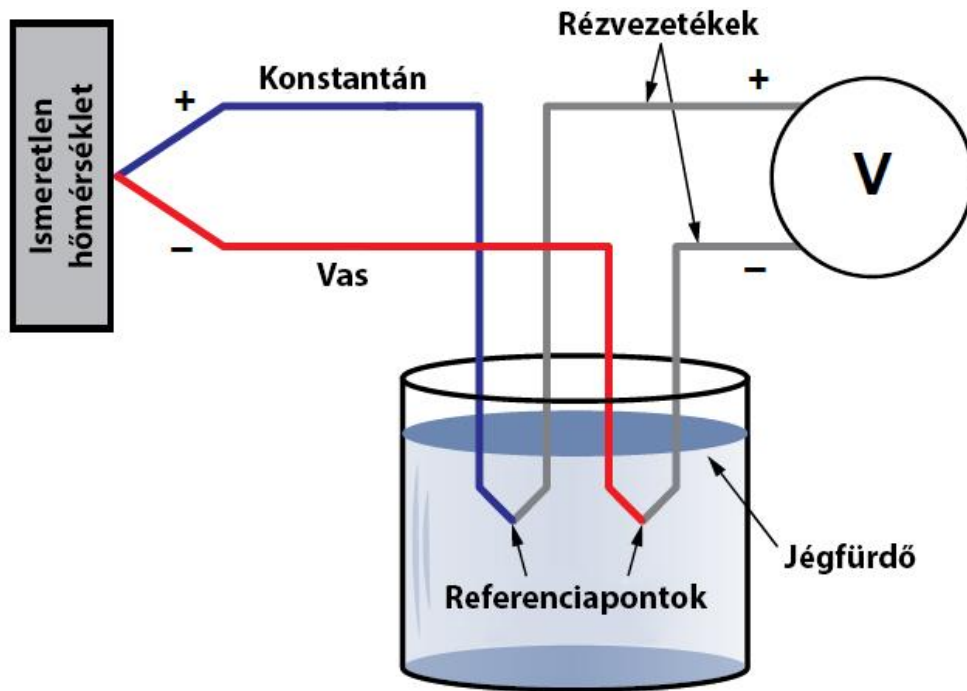
Kimenet: $5\text{mV}/^\circ\text{C}$



Ezt már lehet AD átalakító bemenetére kötni.

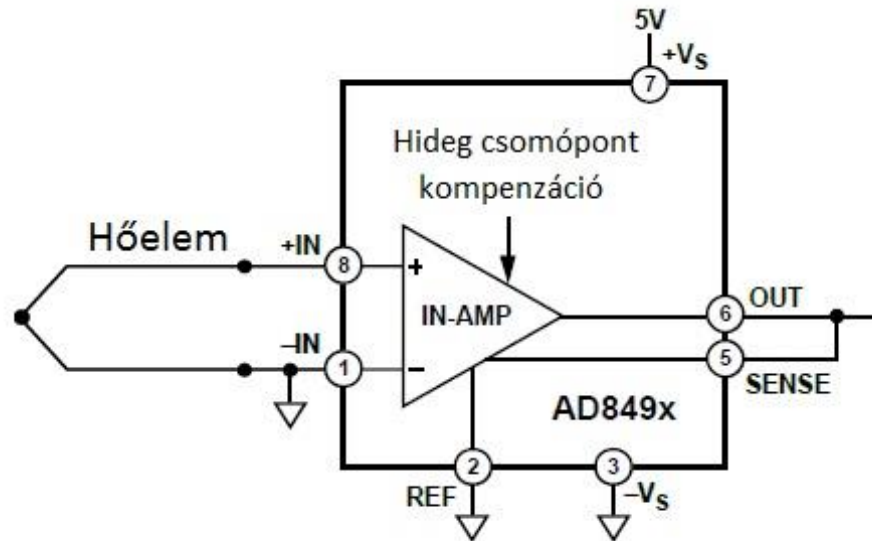


REFERENCIA BEÁLLÍTÁS



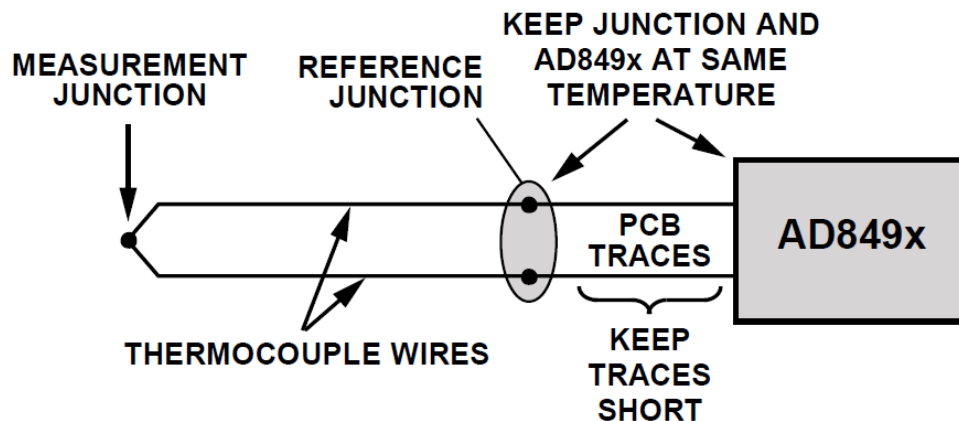
Ahhoz, hogy a melegpont abszolút hőmérsékletét meg tudjuk határozni, ismerni kell a referenciapont hőmérsékletét. Ennek érdekében kezdetben a referenciapontot egy jégfürdőbe merítették, így konstans 0°C fokon tartották.

HŐELEMEK – AD849x CSALÁD



$$V_{OUT}(T_M) = T_M * 5 \frac{mV}{^\circ C} + V_{REF}$$

Ahol: V_{OUT} a kimenő feszültség (V) a T_M (mért hőmérséklet, $^\circ C$) függvényében, V_{REF} a referencia feszültség (V)

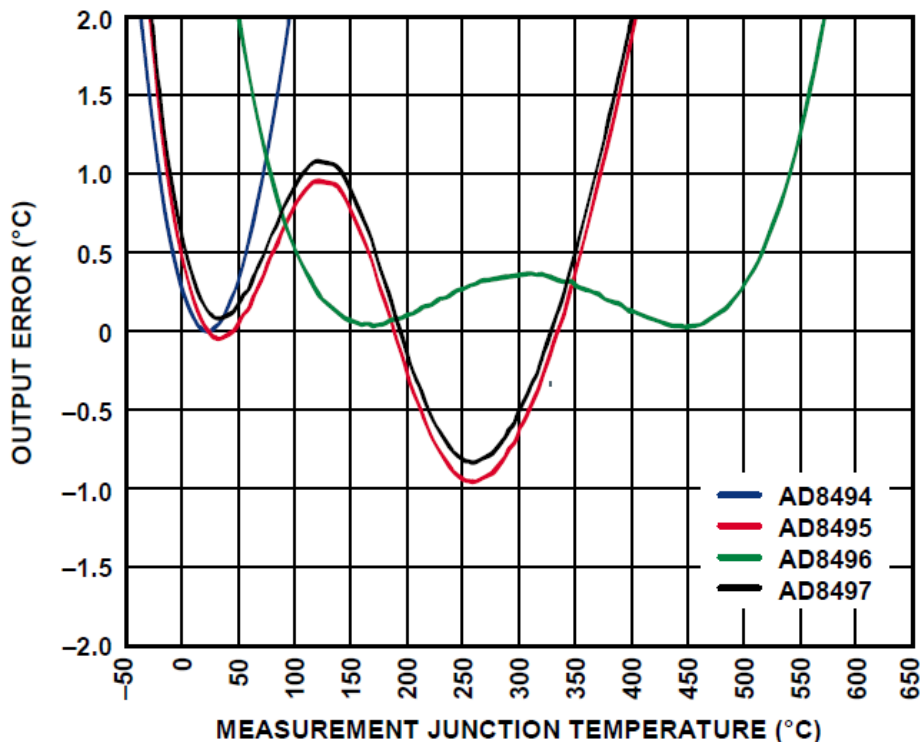


Megfontolás: referencia csatlakozók és a chip közelsége a pontos mérés és hideg csomóponi kompenzáció érdekében. (mérhető)

Forrás: AD849x adatlap

HŐELEMÉK

Forrás: AN-1087



Probléma: Nemlinearitás a különböző hőelemtípusok esetében

Szignifikáns hibalehetőség.

Megoldás: algoritmusok szerinti kompenzálás mikrokontrollerben.

NIST – National Institute of Standards and Technology adatbázisa alapján.
(Táblázatos módszer.)

K-típusú hőelemre (AD8945):

$$T_{MJ} = f_{NIST}((V_{OUT} - V_{REF} - 1.25 \text{ mV})/122.4)$$

Ahol: V_{OUT} a kimenő feszültség (V), a T_{MJ} (mért csomóponti hőmérséklet, °C), f_{NIST} millivolt-hőmérséklet váltási függvény a NIST adatai alapján, V_{REF} a referencia feszültség (V)

TERMISZTOR

TERMISZTOR – Hőmérsékletre érzékeny ellenállás:
10⁶ nagyságrenddel érzékenyebb, mint a tiszta fémek.

$$\alpha = \frac{1}{R_T} \cdot \frac{\Delta R_T}{\Delta T}$$

Ellenállás hőmérsékleti együtthatója/koefficiense.

$$R_T = R_{T0} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

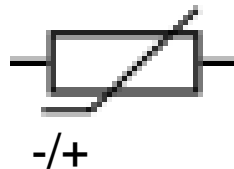
Ellenállás változás hőmérsékletváltozás hatására

NTC – negatív hőmérsékleti koefficiensű termisztorok (pl. szinterelt metál-oxid félvezetők)

PTC – pozitív hőmérsékleti koefficiensű termisztorok (pl. adalékolt polikristályos kerámiák, pl. bárium-titanát alapon)

Szilisztor – lineáris PTC jellegű hőmérsékletérzékeny szilícium ellenállás

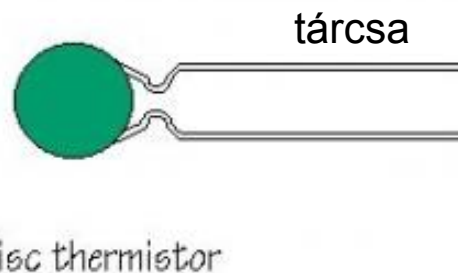
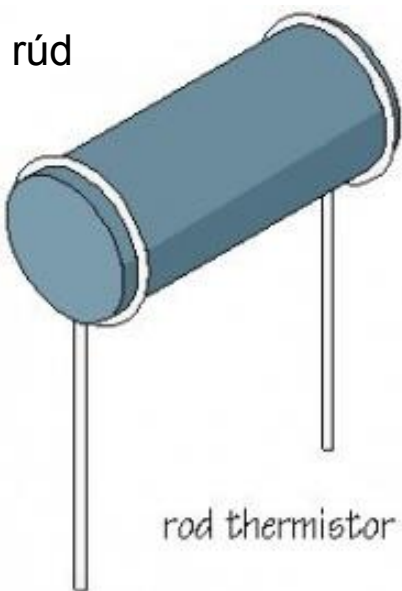
Szimbólum:



Kialakítás:



TERMISZTOR KIALAKÍTÁSI LEHETŐSÉGEK



axiális



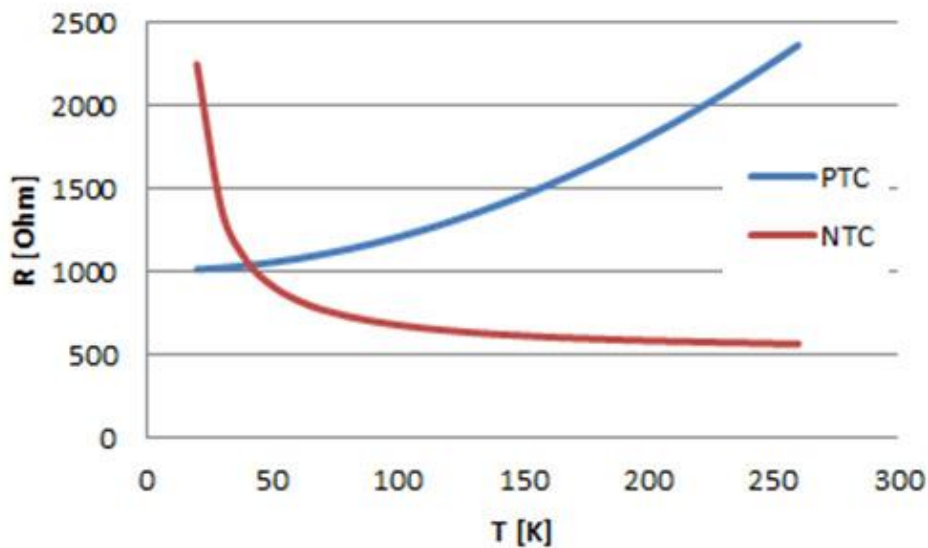
radiális



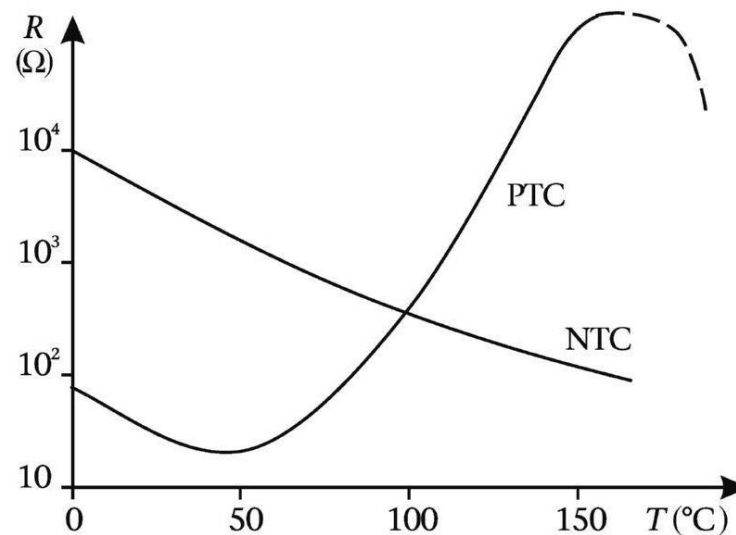
Radiális
gyöngy

Cooke: IGCSE Triple Physics 2011

PTC – NTC KARAKTERISZTIKÁK



Példa forrása: Beckhoff



Példa forrása: Boncoeur.be

PTC – NTC KARAKTERISZTIKÁK

Vékony/vastagréteg fémellenállásoknál szükség lehet egy bonyolultabb leírásra:

$$R_T = R_{T_0} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T + \beta \cdot \Delta T^2 + \dots)$$

Ahol α a lineáris hőmérsékleti együttható, β pedig a négyzetes hőmérsékleti együttható.

Ez utóbbi együttható a fémeknél ugyan nagyon kicsi, de teljesen nem minden alkalommal hanyagolható el. Emiatt az ilyen szenzorok mérési érzékenysége többnyire egy közepes TK-val, a „TK 100-zal” jellemezhető. A TK 100 a jelleggörbe átlagos emelkedésének felel meg 0 °C és 100 °C között.

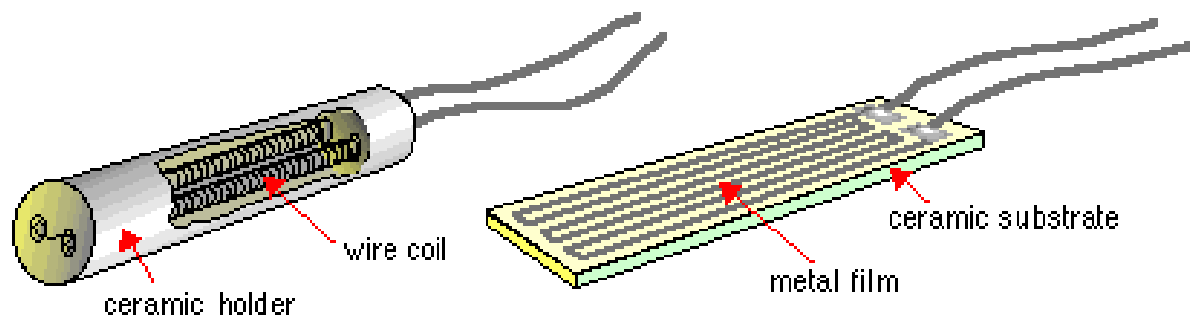
$$TK100 = \frac{R(100^\circ C) - R(0^\circ C)}{R(0^\circ C) \cdot 100K}$$

RTD – ELLENÁLLÁS HŐMÉRŐ

Tiszta anyagból (platina, nikkel, réz) készült ellenállás hőmérsékletfüggésének követése megfelelő korreláció alapján.

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100R_0}$$

Ellenállás hőmérsékleti együtthatója, ahol R_{100} az ellenállás értéke 100 °C-on, R_0 értelmében 0 °C-on. [Ohm/Ohm/°C] (ellenállás meredeksége praktikusán)



Wire RTD Construction

Film RTD Construction

www.capgo.com

RTD – TÍPUSOK

Fém		Hőmérséklet tartomány	α	Megjegyzések
<i>Réz</i>	Cu	-200°C - 260°C	0.00427	Alacsony ár
<i>Molibdén</i>	Mo	-200°C - 200°C	0.00300 0.00385	Az alacsony mérési tartományban olcsóbb a platinánál
<i>Nikkel</i>	Ni	-80°C - 260°C	0.00672	Alacsony ár, de szűk mérési tartomány
<i>Nikkel-vas</i>	Ni- Fe	-200°C - 200°C	0.00518	Alacsony ár
<i>Platina</i>	Pt	-240°C - 660°C	0.00385 0.00392 0.00377	Precíz, akár 1000°C-os tartományon is...

PT – PLATINA HŐMÉRŐK

Tolerancia osztályok	Tolerancia fv. (°C)
Class A	$\pm (0.15 + 0.002 \cdot T)$
Class B	$\pm (0.30 + 0.005 \cdot T)$
Class C	$\pm (0.40 + 0.009 \cdot T)$
Class D	$\pm (0.60 + 0.0018 \cdot T)$

Platina alapú ellenállás hőmérők:



Hőmérséklettartomány: -200 től $+850$ °C-ig

PT100: 100Ω 0 °C-on és 138.4Ω 100 °C

PT1000: 1000Ω 0 °C-on

1 °C változás 0.384Ω változást jelent.

Nemlinearitás: ITS-90 szabvány alapján linearizálhatunk



Callendar–Van Dusen egyenletek: $R_T = R_0 [1 + AT + BT^2 + CT^3(T - 100)]$ (-200 °C $< T < 0$ °C),
 $R_T = R_0 [1 + AT + BT^2]$ (0 °C $\leq T < 850$ °C).

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

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

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

HŐLEMEK VS RTD

	HŐLEMEK	RTD-k
Pontosság	Szélesebb hibasávok	Szűkebb hibasávok
Mechanikai stabilitás	Kiváló	Nyomásra, rázásra érzékeny
Méret	Kisebb	Nagyobb
Felbontás	mV/fok; alacsonyabb jel/zaj arány	Ohm/fok; magasabb jel/zaj arány
Hidegpont ref.	Szükséges	Nem szükséges
Hozzávezetés, toldás	Illeszkedjen a vezeték anyaghoz	Rézvezetékekkel bővíthető
Válasz	ms válaszidő	Nagy hőkapacitás miatt másodperces is lehet
Ár	olcsó	Magasabb ár

HŐMÉRÉS - ADATGYŰJTÉS



Példa: Novus myPCLab

- Univerzális kettős analóg bemenet.
- Belső hőelem a hidegponti kompenzációhoz és a szobahőmérséklet méréséhez.
- Programozható bemenetek: J, K, T, E, N, R, S és B hőelemek; PT100 RTD (3-wire),
- 4-20 mA, 0-50 mVdc vagy 0-10 Vdc. (AD)
- Pontosság: 0.2% Pt100 teljes skálájára.
0.25% $\pm 3^{\circ}\text{C}$ R,S és B hőelemekre;
- 0.25% $\pm 1^{\circ}\text{C}$ a többire;
- $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ belső hőmérőre.
- Automata hidegponti kompenzáció a hőelemekhez;
- Kábel ellenállás kompenzáció PT100-hoz.

HŐMÉRÉS – ADATGYŰJTÉS AZ ELEKTRONIKAI GYÁRTÁSBAN



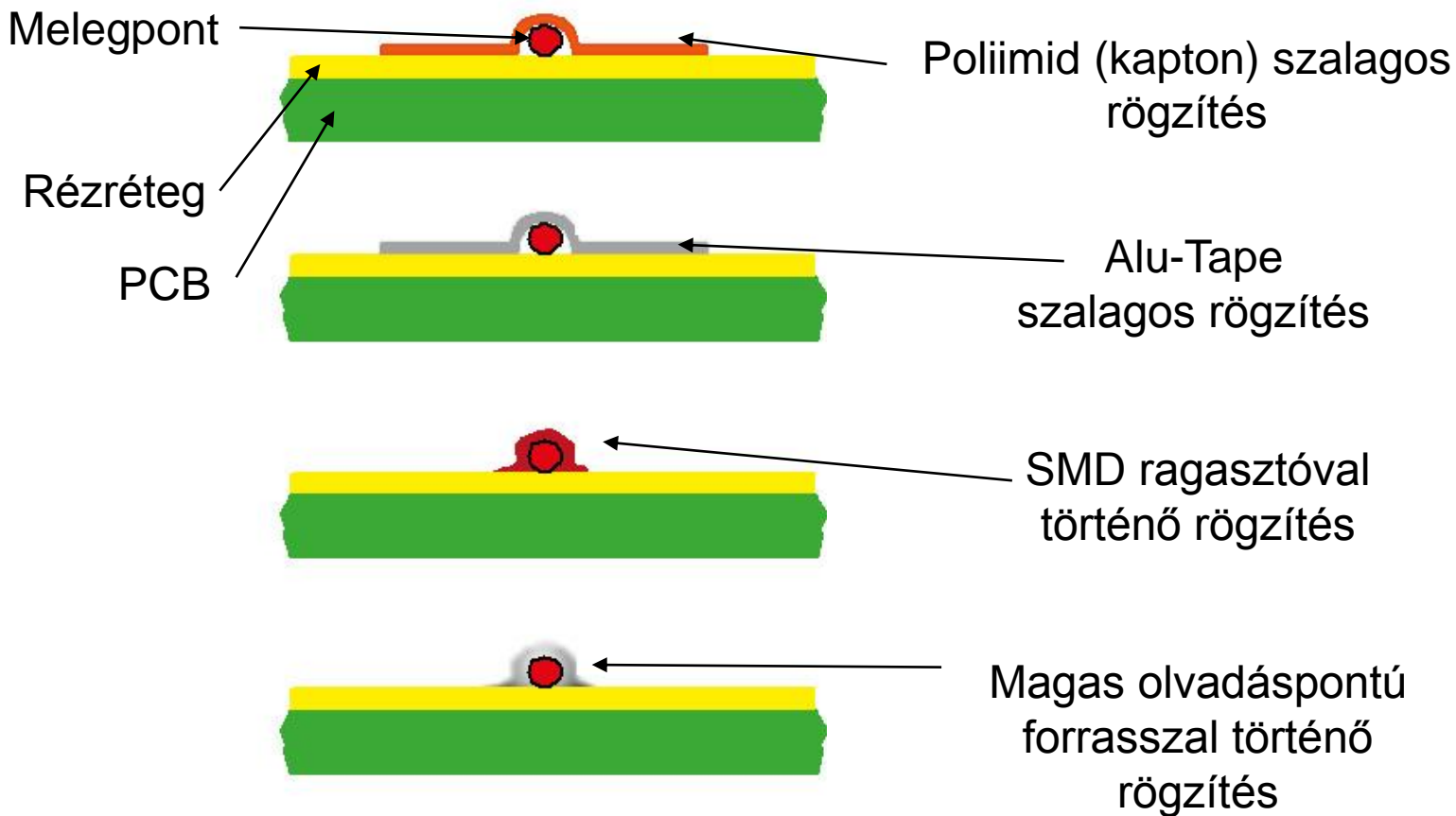
Példa: ECD VMOLE

Mérési tartomány:	-200 – +1271 °C
Működési tartomány	-40° – +85 °C
Hőelemek:	3 Mini csatlakozó, Type K
Pontosság	+/- 1° C (1.8° F)
Felbontás:	0.056°C (0.1° F)
Méretek:	145mm x 64mm x 7.62mm
Mintavétel	0.1 s – 24 óra
Adattár:	96 hőprofil.



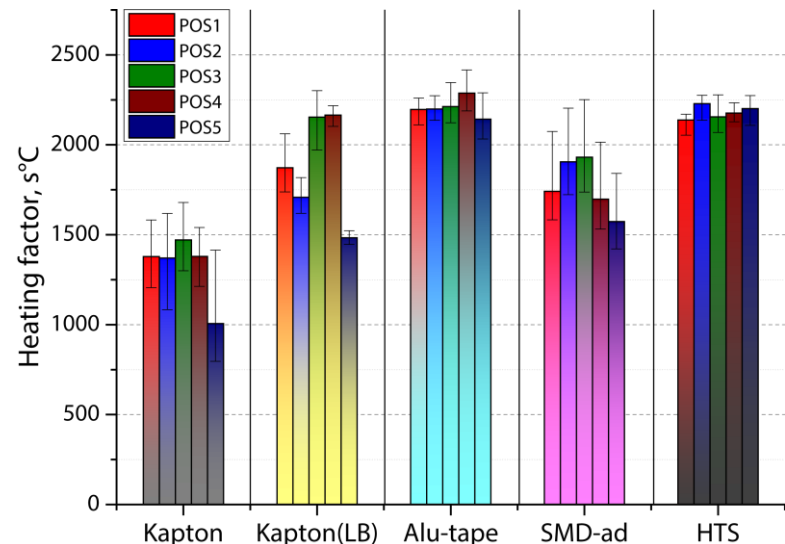
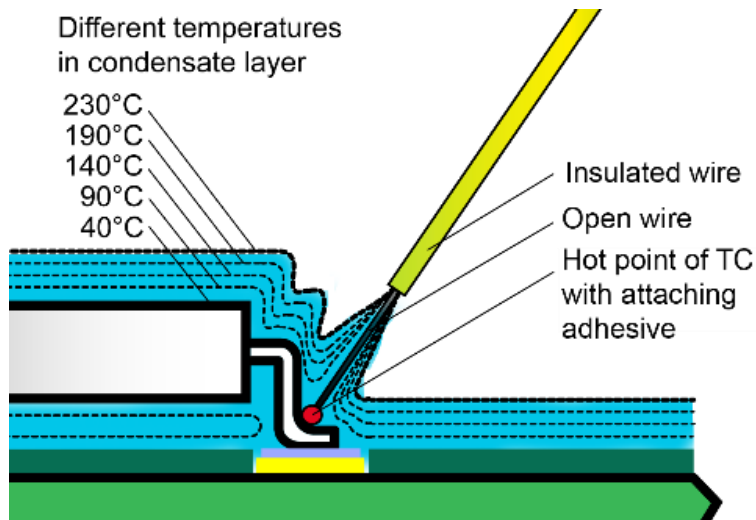
Köpeny: ezzel küldik be az alagút reflow kemencébe. (Hőálló kazetta és hőszigetelő külső burkolat)

HŐMÉRÉS – ADATGYŰJTÉS AZ ELEKTRONIKAI GYÁRTÁSBAN



HŐMÉRÉS – ADATGYŰJTÉS AZ ELEKTRONIKAI GYÁRTÁSBAN

Probléma: gőzfázisú forrasztásnál kondenzátum felkúszik a nyílt kábelvégre. A vezetéket is melegíti.



Fűtési faktor vizsgálattal (a forrasz olvadáspontja felett töltött görbe integrálása) is kimutatható a nyílt kábelvég problémája. Alu-tape és a HTS kiemelkedően jól ismételhető mérést garantál.