MŰEGYETEM 1782

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

SZENZOROK ALKALMAZÁSOKBAN

TERMIKUS ÉRZÉKELŐK ÉS ALKALMAZÁSAIK

Géczy Attila gattila@ett.bme.hu

Utoljára módosítva: 2017.12.06.

Ajánlott irodalom, források:

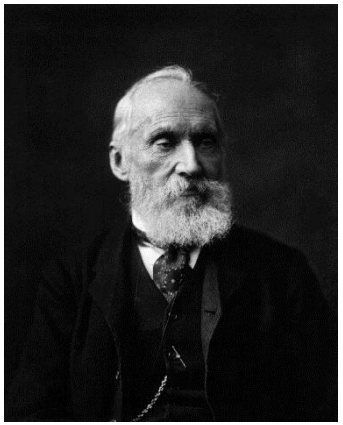
- Robert P. Benedict. *Fundamentals of Temperature, Pressure, and Flow Measurements, Third Edition*
- *WIKA Handbook, Pressure & Temperature Measurement, 2008*
- *www.tcdirect.com*

BMEETT
ELEKTRONIKAI TECHNOLÓGIA TANSZÉK

BUDAPEST UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND ECONOMICS
DEPARTMENT OF ELECTRONICS TECHNOLOGY

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).

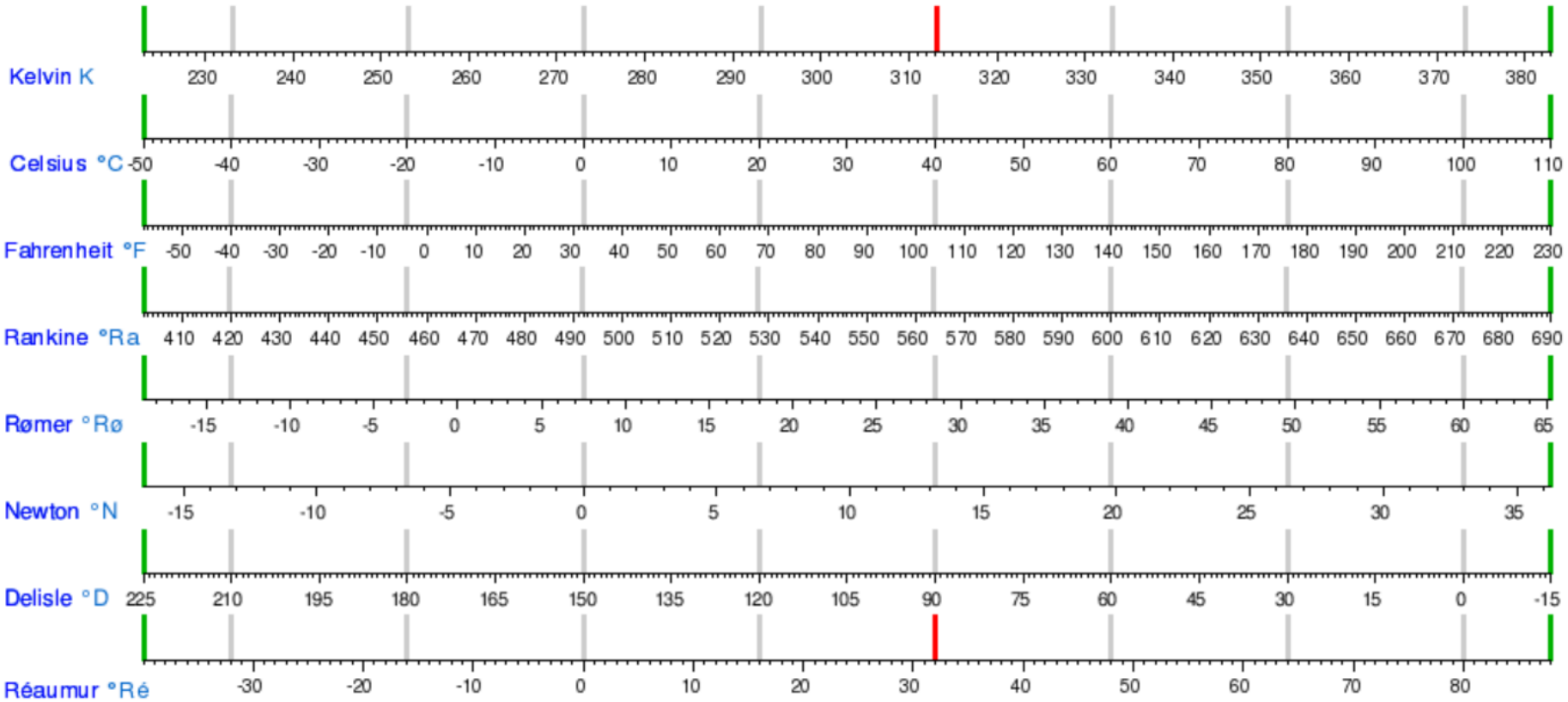
Abszolút skála fix vonatkoztatási pontja: víz hármaspontja (hármaspontban egyensúlyi viszonyok között mindhárom fázis stabil): **273,16 K.**

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 sklála – pontos gyakorlati közelítésekre.

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

KONVERZIÓS TÁBLA



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

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

HŐMÉRSÉKLETI SKÁLÁK KÖZÖTTI VÁLTÁS

$$1\,K \triangleq 1\,°C = \frac{9}{5}\,°F$$

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

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

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

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

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

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

HŐELEMEK – SEEBECK EFFEKTUS

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

$$U = \int_{T1}^{T2} S(T)\, dT$$

ahol: U – potenciálkülönbség, T1, T2 a vezető két végpontjának hőmérséklete, S – Seebeck koefficiens

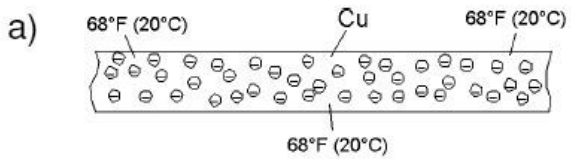
Két különböző vezető, közös melegpont:

$$U = \int_{T1}^{T2} S_A(T) - S_B(T)\, dT$$

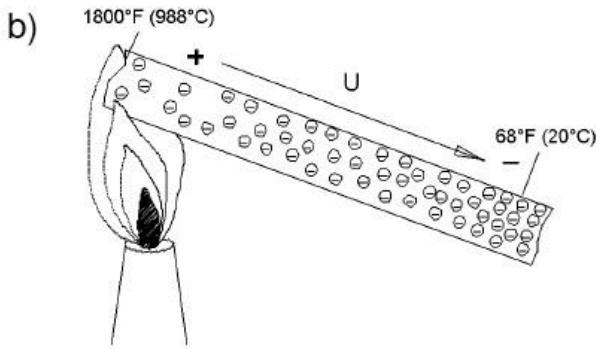
Számolni kell a Seebeck effektus nemlinearitásával!

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

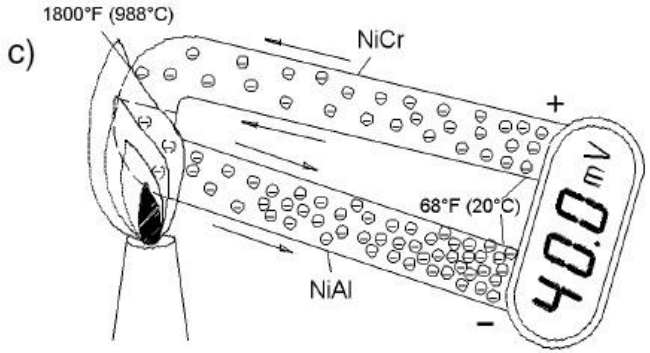
HŐELEMEK – SEEBECK EFFEKTUS



Homogén hőmérsékleteloszlás



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



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

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

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 ± .75%
Speciális: ± 1°C vagy ± 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 *Intrinsically Safe*	BS 1843	DIN 43710	JIS C 1610	NFC 42-324
K	Nickel - Chromium Nickel - Aluminium *(magnetic)*	Brown, Yellow (+), Red (-)	Yellow (+), Yellow, Red (-)	Yellow	Green, Green (+), White (-)	Blue, Green (+), White (-)	Red, Brown (+), Blue (-)	Green, Red (+), Green (-)	Blue, Red (+), White (-)	Yellow, Yellow (+), Purple (-)

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

HŐELEMEK – 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 ± .75%
Speciális: ± 0.5°C vagy ± 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 *Inzrinsically Safe*	BS 1843	DIN 43710	JIS C 1610	NFC 42-324
T	Copper	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 (+ -)
	Constantan (Copper-Nickel)									

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

HŐELEMEK – 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 ± .75%
Speciális: ± 1.1°C vagy ± 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 *Intrinsically 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 (-)

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

HŐELEMEK – TÍPUSOK ÖSSZEFOGLALÁSA

Forrás: mosaic-industries.com

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

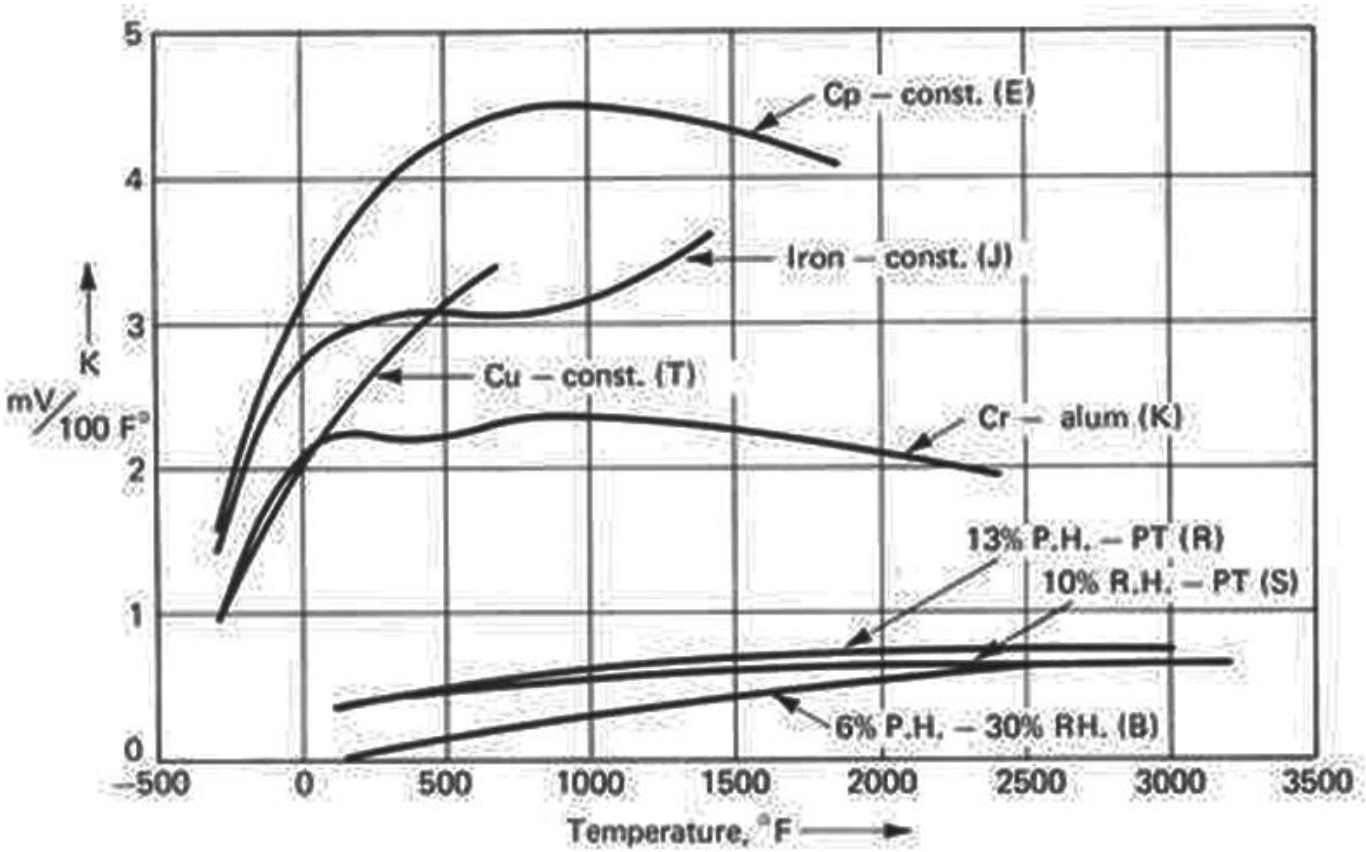
WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

HŐELEMEK – SZÍNTÁBLÁZAT

Forrás: reoterm.com

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

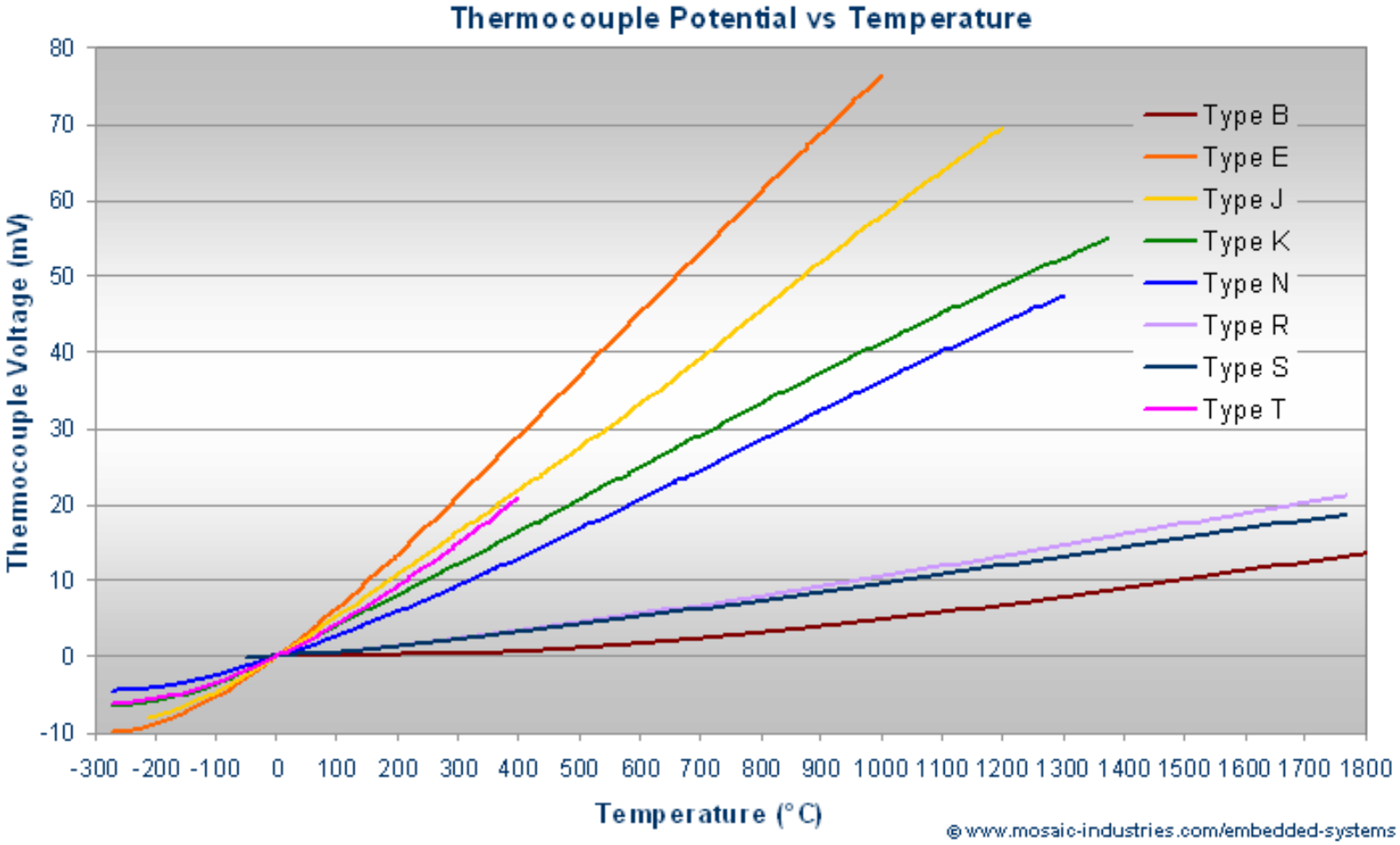
HŐELEMEK – NEMLINEARITÁS



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

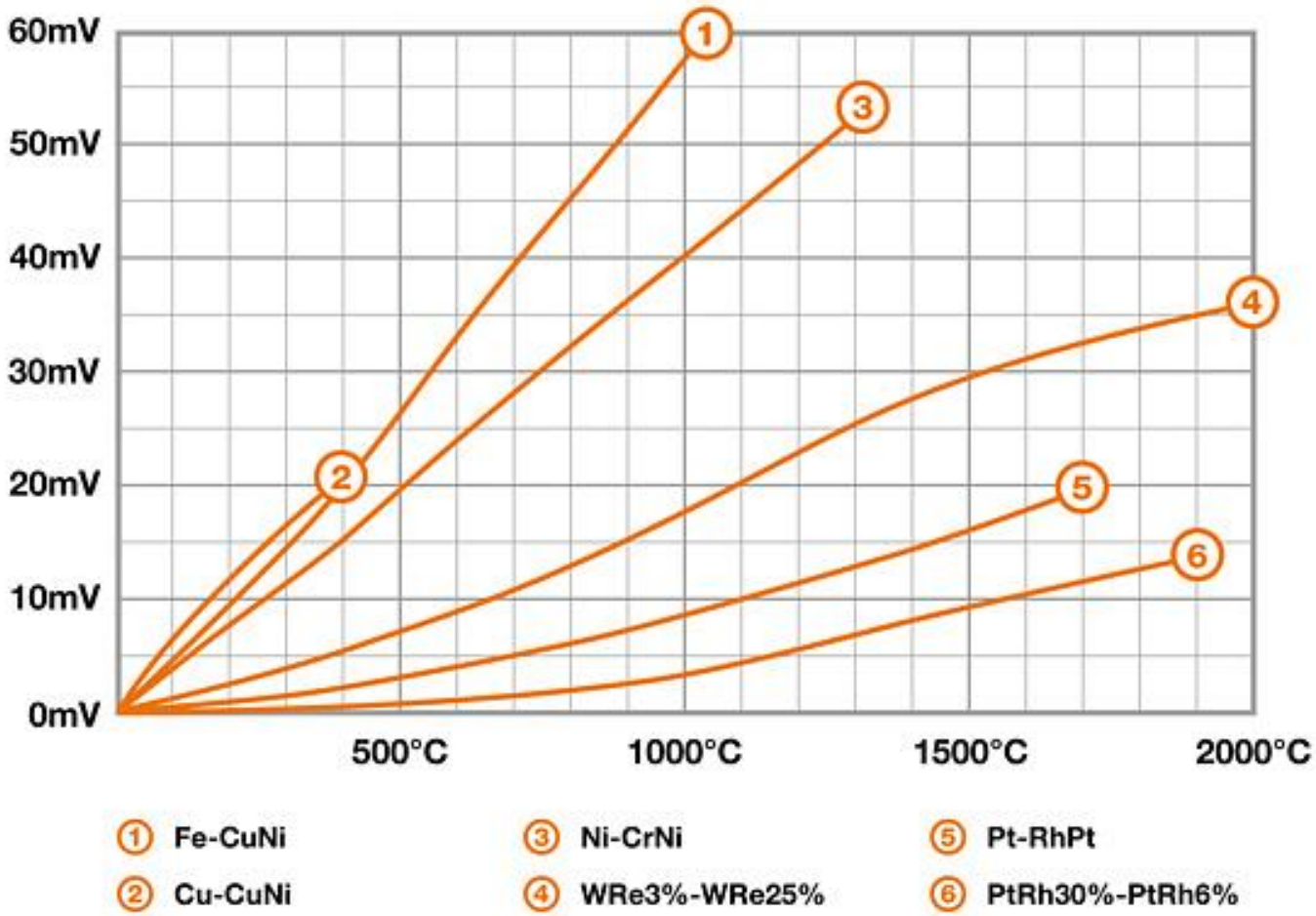
WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

HŐELEMEK – NEMLINEARITÁS



WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

HŐELEMEK - NEMLINEARITÁS



Günther GmbH

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

HŐELEMEK – NEMLINEARITÁS

A K és J-típusú termoelemek népszerűségének egyik oka, hogy esetükben egy széles hőmérséklet-tartományon **közel lineárisnak mondható** a Seeback-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

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

Üvegszálas szigetelésű

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

PTFE szigetelésű

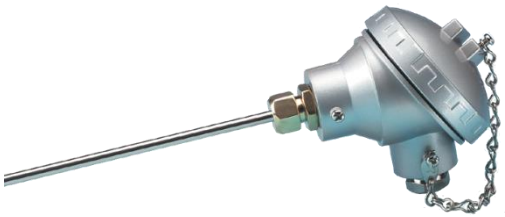
- Hegesztett melegpont
- Teflon (politetrafluoretilén) borítás
- Gáz, gőz, víz elleni védelem
- Tartomány: (-75 – 250°C)
- 0.2 mm vezetékátmérő

Növekvő ár ($$$) →

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

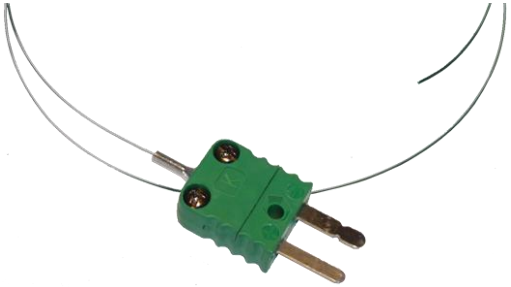
HŐELEMEK - TÍPUSOK

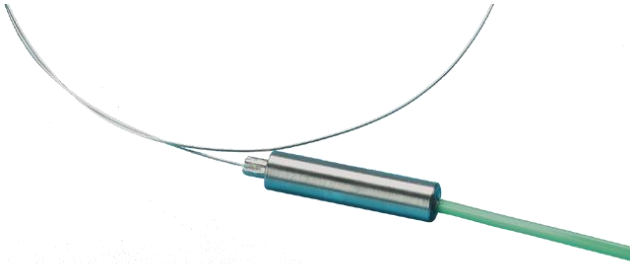
KÖPENYHŐELEM (vízálló fej)



KÖPENYHŐELEM (krimpelt persely)

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





MINI HŐELEMTÍPUSOK

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

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

HŐELEMEK – SPECIÁLIS TÍPUSOK

ALÁTÉT (-10 – 400 °C)

ABA-BILINCS (-100 - 400°C)

CSAVAR (-30-250°C)

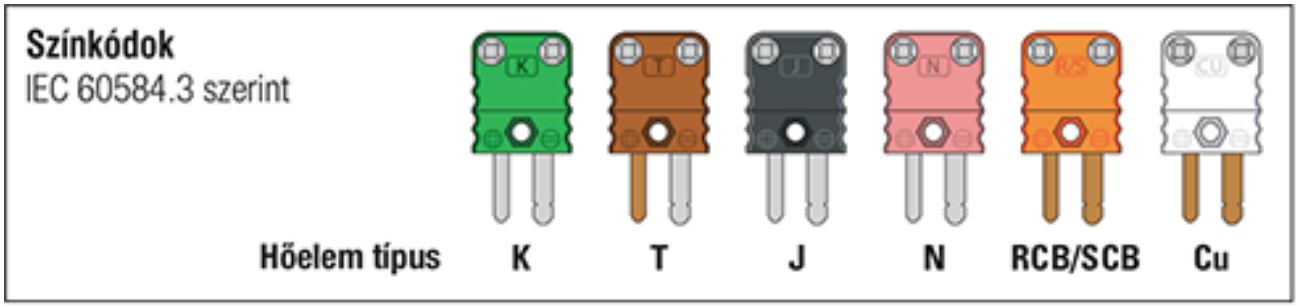
KERÁMIACSŐ (akár 1000 °C feletti tartományokban is)

HŐÁLLÓ MÁGNES (-10 °C – 300 °C)

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

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

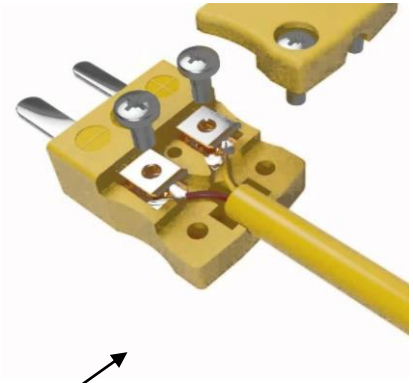
HŐELEMEK – CSATLAKOZÓK



Csatlakozó típusokhoz rendelt színkódok

Mini-csatlakozók (lapos)

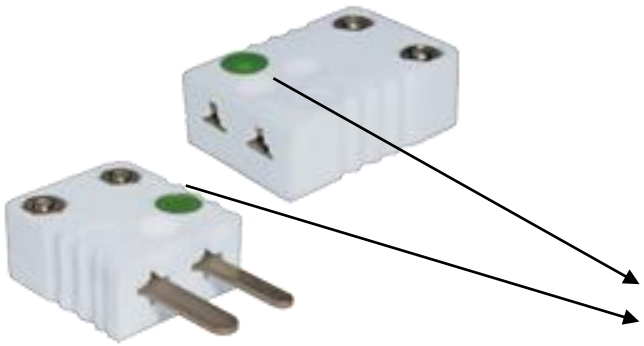
Mini-csatlakozók (hengeres lábú-villás pár)



Csavaros rögzítés

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

HŐELEMEK – 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

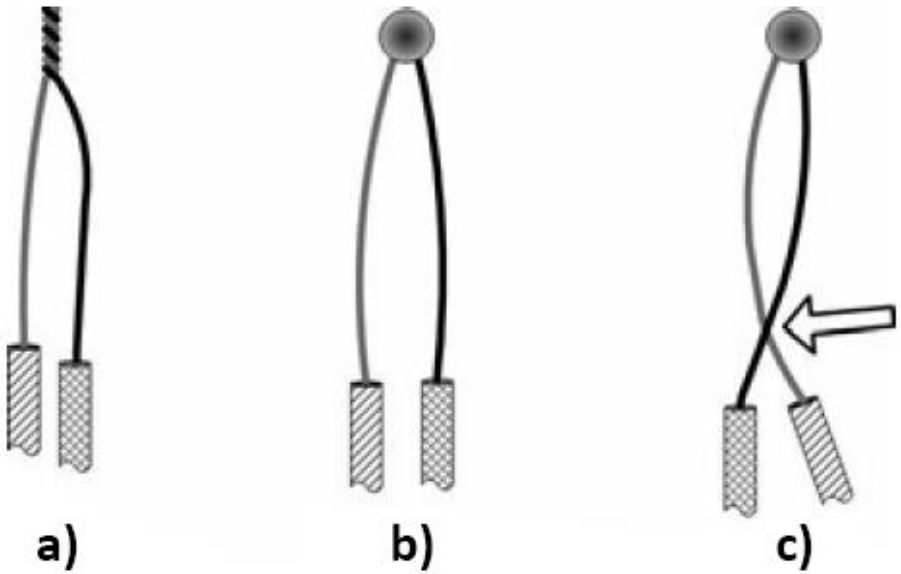
Paneles

Modulrendszerű (egyidejű csatlakoztatás)

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

HŐELEMEK – MELEGPONT TECHNIKÁK

Clyde F. Coombs: Jr.: Printed Circuits Handbook

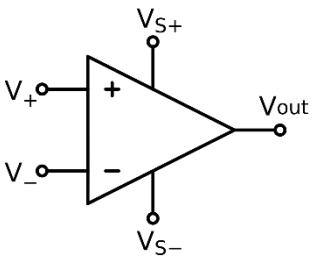


Melegpont: a) csavarrással, b) hegesztéssel, c) összeérő vezetékek, mérési hibát okoz

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

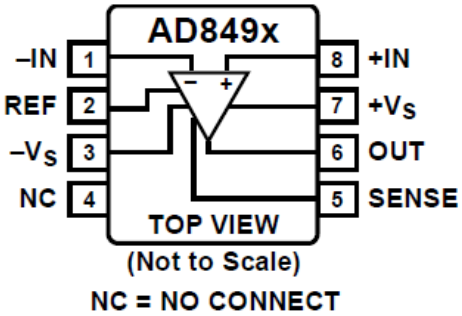
HŐELEMEK – DIREKT ILLESZTÉS

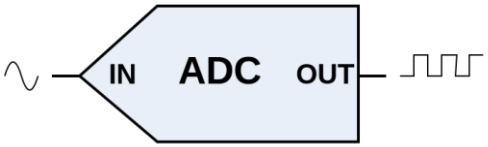
Probléma: kimenetén Seebeck feszültségkülönbség
(K típusú hőelemnél: **41µV/°C)**



Megoldás: erősítő alkalmazása.
Például AD849x.

Kimenet: **5mV/°C**

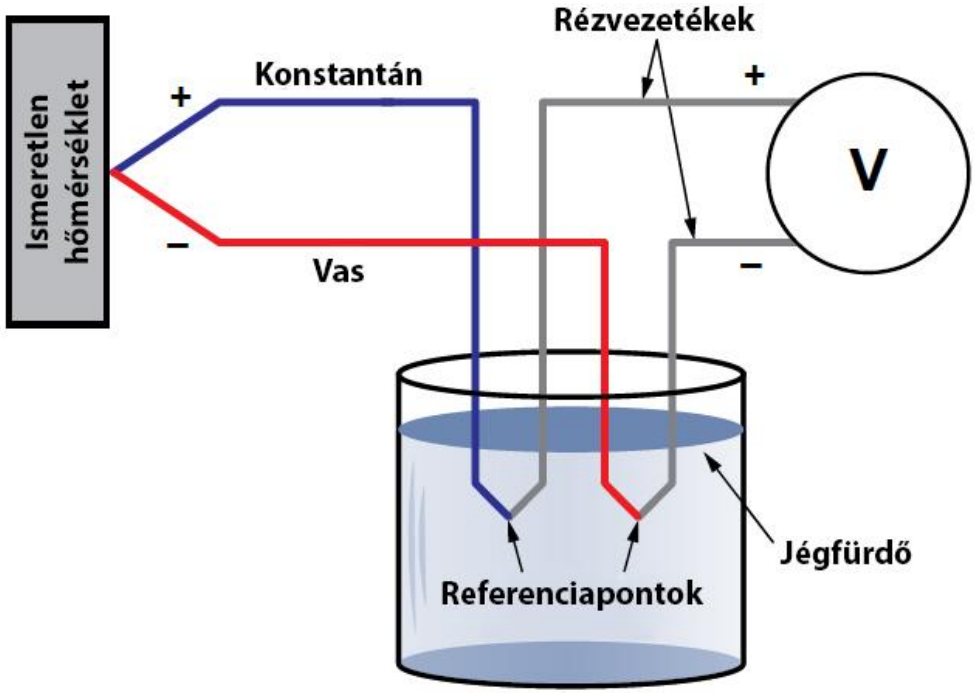




Ezt már lehet AD átalakító bemenetére kötni.

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

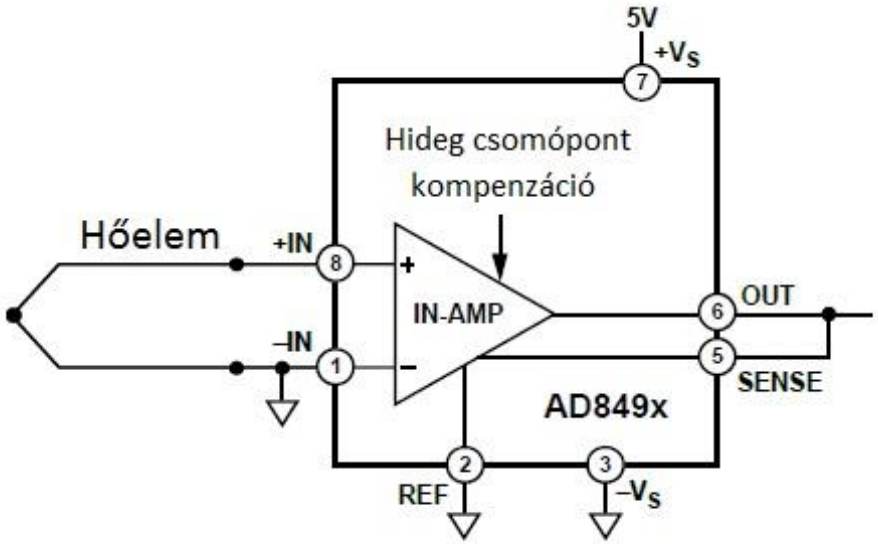
REFERENCIA BEÁLLÍTÁS



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.

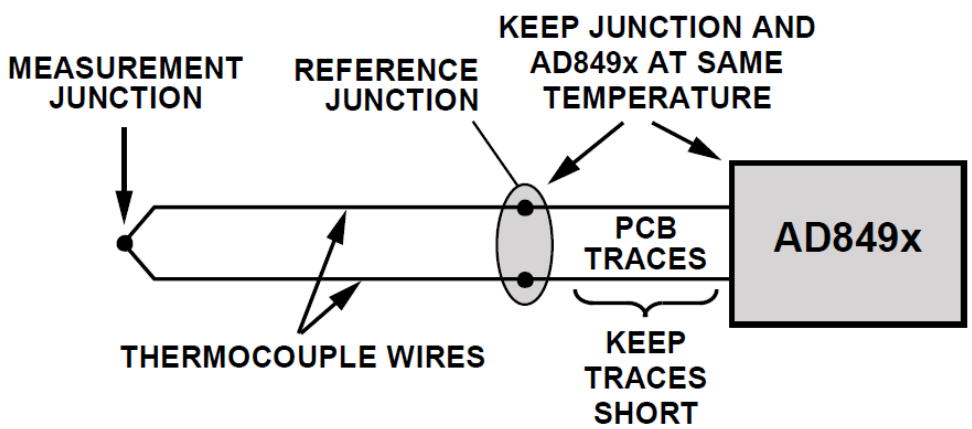
WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

HŐELEMEK – AD849x CSALÁD



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

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



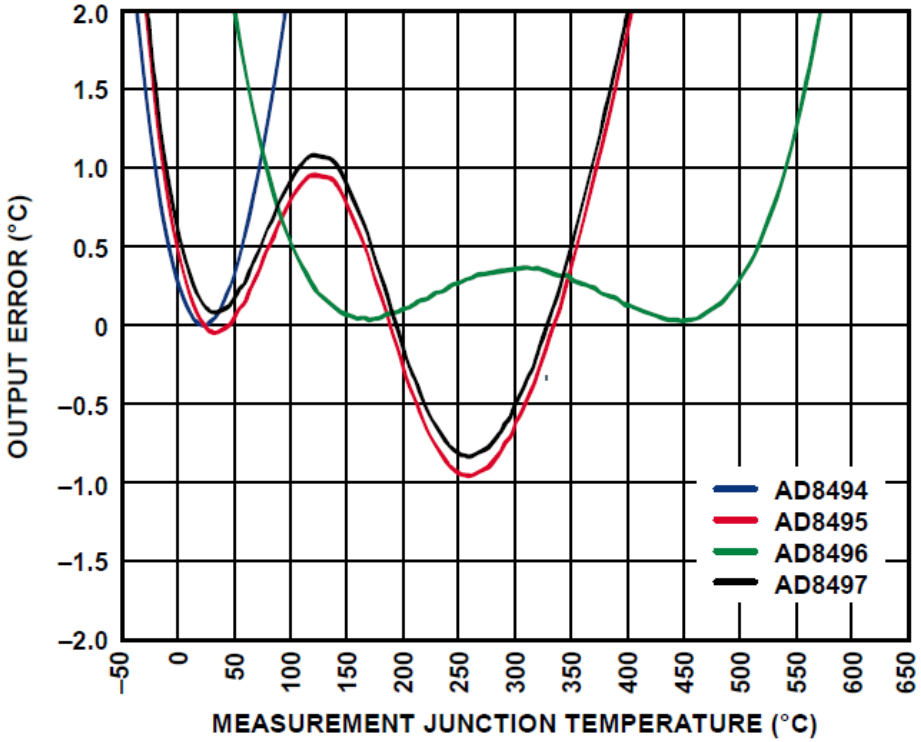
Megfontolás: referencia csatlakozók és a chip közelsége a pontos mérés és hideg csomóponti kompenzáció érdekében. (mérhető)

Forrás: AD849x adatlap

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

HŐELEMEK

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):

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

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)

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

TERMISZTOR

TERMISZTOR – Hőmérsékletre érzékeny ellenállás:
10^6 nagyságrenddel érzékenyebb, mint a tiszta fémek.

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

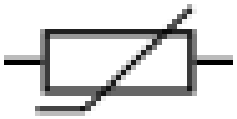
Ellenállás hőmérsékleti együtthatója/koefficiense.

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

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:

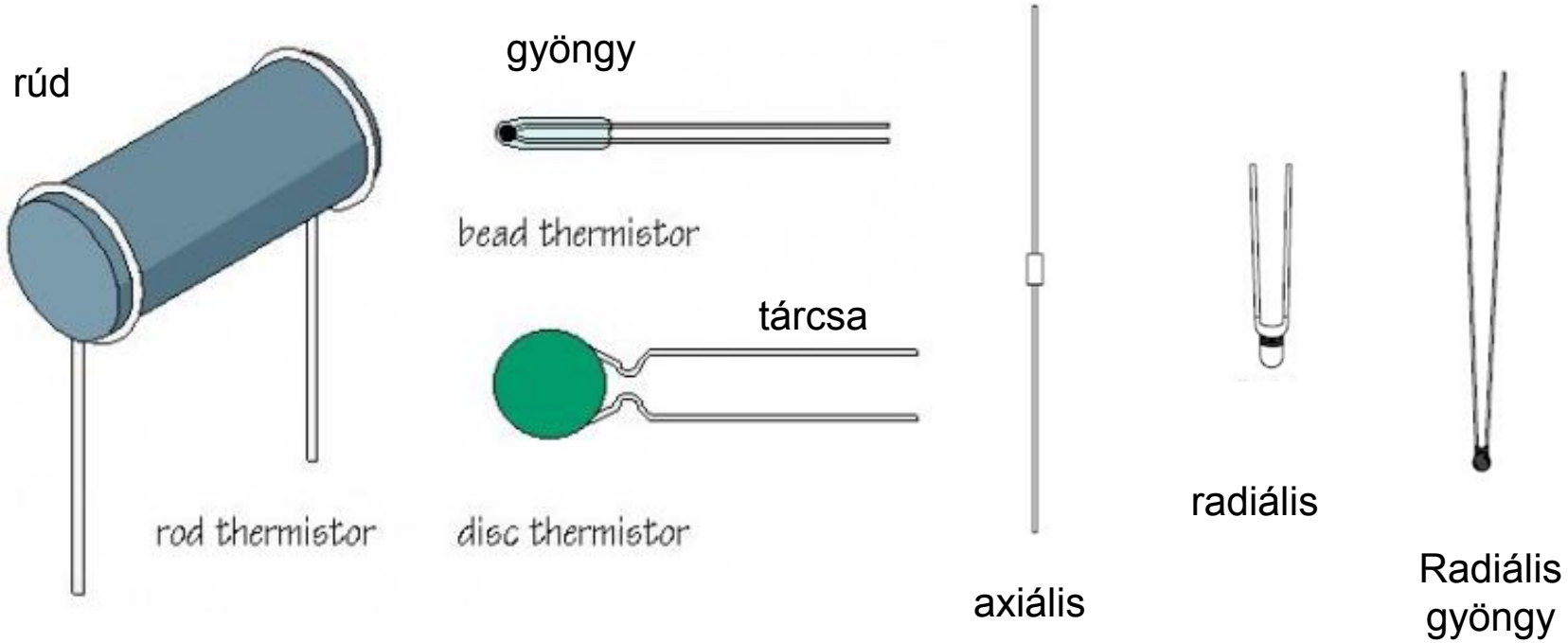


-/+

Kialakítás:

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

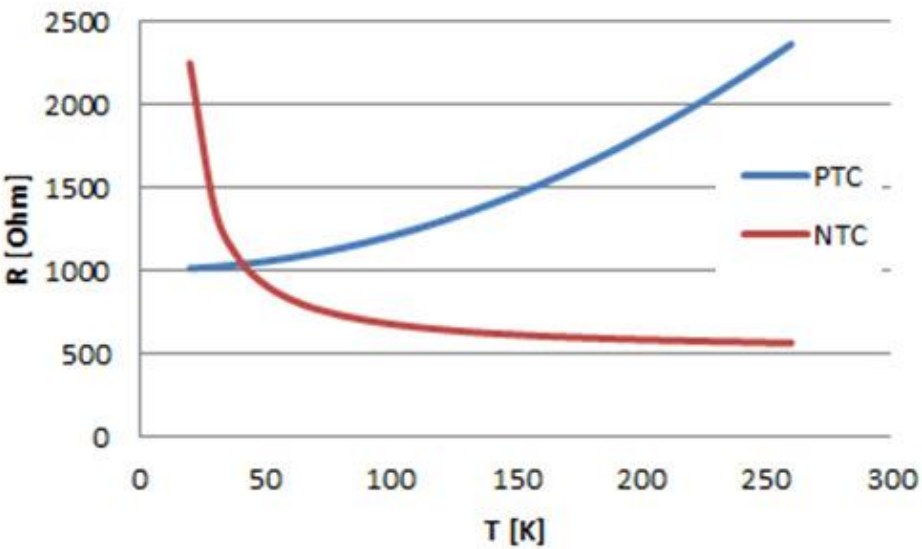
TERMISZTOR KIALAKÍTÁSI LEHETŐSÉGEK



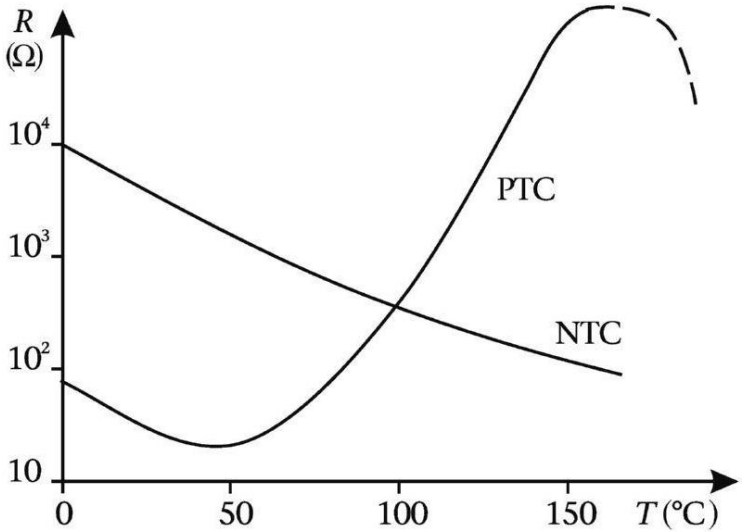
Cooke: IGCSE Triple Physics 2011

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

PTC – NTC KARAKTERISZTIKÁK



Példa forrása: Beckhoff



Példa forrása: Boncoeur.be

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

PTC – NTC KARAKTERISZTIKÁK

Vékony/vastagréteg fémellenállásoknál szükség lehet egy bonyolultabb leírásra:

$$R_T = R_{T0} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T + \beta \cdot \Delta T^2 + \ldots)$$

Ahol α a lineráis 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 érzéenysége 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.

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

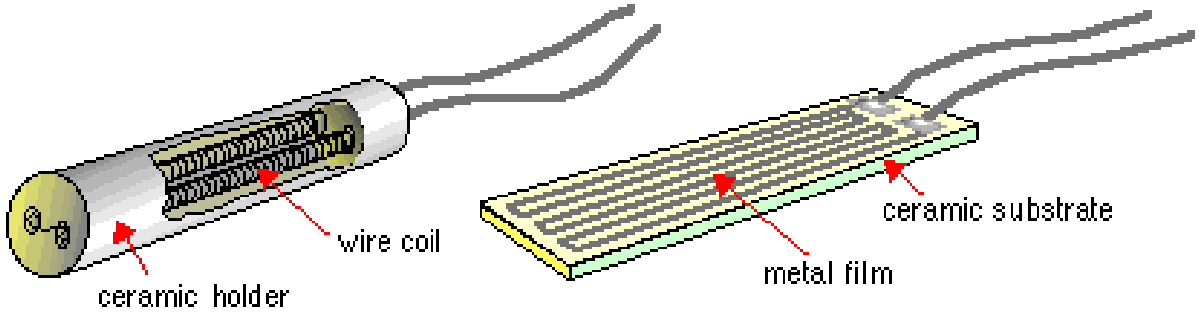
WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

RTD – ELLENÁLLÁS HŐMÉRŐ

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

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

Ellenállás hőmérsékleti együtthatója, ahol R_{100} az ellenállás értéke 100 °C-on, R0 értelmszerűen 0 °C-on. [Ohm/Ohm/°C] (ellenállás meredeksége praktikusan)



Wire RTD Construction

Film RTD Construction

www.capgo.com

RTD – TÍPUSOK

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

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

PT – PLATINA HŐMÉRŐK

Tolerancia osztályok	Tolerancia fv. (°C)
Class A	± (0.15 + 0.002.|T|)
Class B	± (0.30 + 0.005. |T|)
Class C	± (0.40 + 0.009. |T|)
Class D	± (0.60 + 0.0018. | T|)

Platina alapú ellenállás hőmérők:

Hőmérséklettartomány: –200 től +850 °C-ig
PT100: 100 Ω 0 °C-on és 138.4 Ω 100 °C
PT1000: 1000 Ω 0 °C-on
1 °C változás 0.384 Ω változást jelent.

Nemlinearitás: ITS-90 szabvány alapján linearizálhatunk

Callendar–Van Dusen egyenletek:

$$R_T = R_0\left[1 + AT + BT^2 + CT^3(T-100)\right] \quad (-200\,^\circ\mathrm{C} < T < 0\,^\circ\mathrm{C}),$$

$$R_T = R_0\left[1 + AT + BT^2\right] \quad (0\,^\circ\mathrm{C} \le T < 850\,^\circ\mathrm{C}).$$

$$A = 3.9083 \times 10^{-3}\,^\circ\mathrm{C}^{-1} \qquad B = -5.775 \times 10^{-7}\,^\circ\mathrm{C}^{-2} \qquad C = -4.183 \times 10^{-12}\,^\circ\mathrm{C}^{-4}.$$

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

HŐLEMEK VS RTD

	HŐELEMEK	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	Rézvezetékkel bővíthető
Válasz	ms válaszidő	Nagy hőkapacitás miatt másodperces is lehet
Ár	olcsó	Magasabb ár

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

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% ±3°C R,S és B hőelemekre;
- 0.25% ±1°C a többire;
- ±1,5ºC belső hőmérőre.
- Automata hidegponti kompenzáció a hőelemekhez;
- Kábel ellenállás kompenzáció PT100-hoz.

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

HŐMÉRÉS – ADATGYŰJTÉS AZ ELEKTRONIKAI GYÁRTÁSBAN

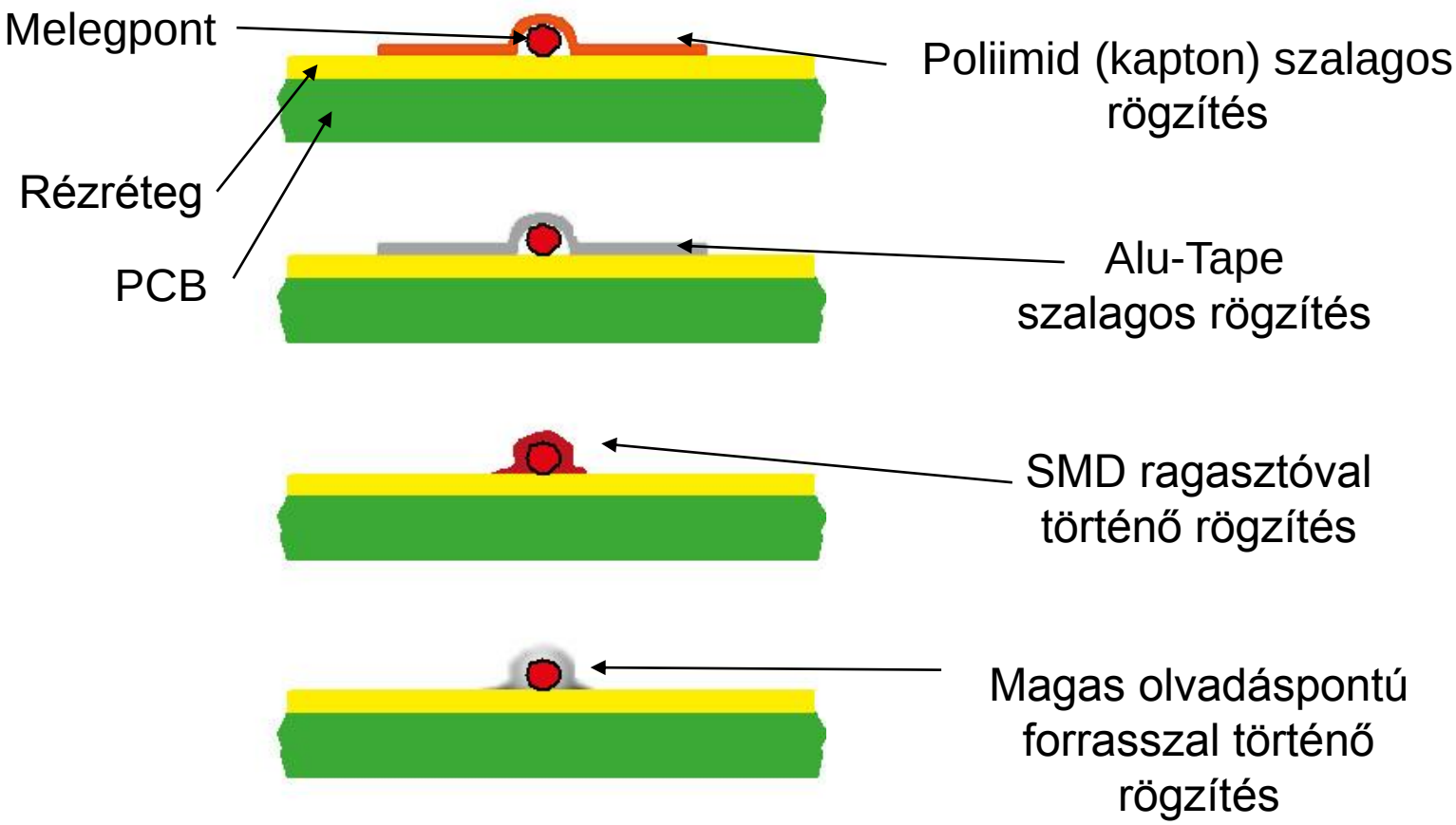
Mérési tartomány:	-200 – +1271 °C
Működési tartomány	-40° – +85 °C
Hőelemek:	3 Mini csatlakozó, Type K
Pontosság	+/- 1° C (1.8° F)
Felbontás:	0.056°C (0.1° F)
Méretek:	145mm x 64mm x 7.62mm
Mintavétel	0.1 s – 24 óra
Adattár:	96 hőprofil.

Példa: ECD VMOLE

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

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

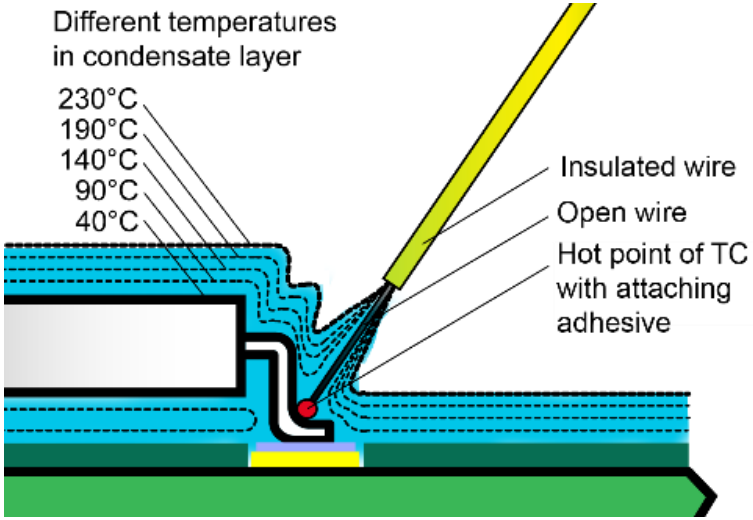
HŐMÉRÉS – ADATGYŰJTÉS AZ ELEKTRONIKAI GYÁRTÁSBAN

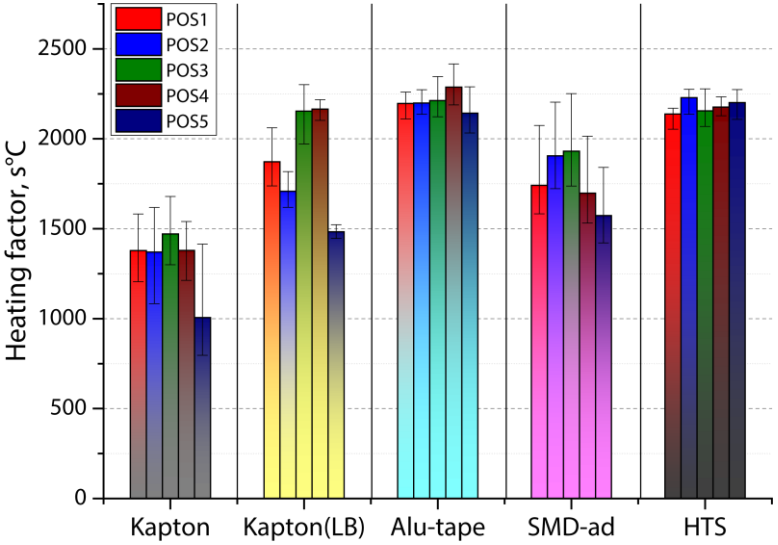


WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS

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.

WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS