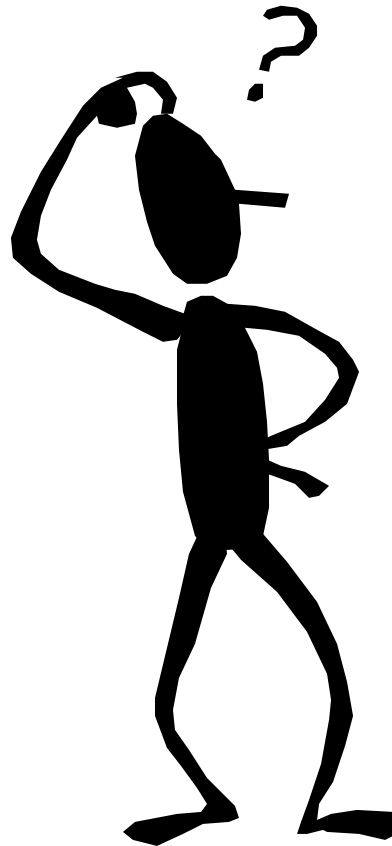


# *LÄMPÖTILA*



Celsiusasteikolla on vain kaksi kiintopistettä: veden jäätympiste ja veden kiehumispiste.

Kelvinasteikon kiintopisteet ovat: absoluuttinen nollapiste lämpötilassa  $-273,15\text{ °C}$  ( $0\text{ K}$ ) ja veden kolmoispiste  $0,01\text{ °C}$  ( $273,16\text{ °C}$ ).

Asteikkojen erotus on siis  $273,15\text{ °C}$ .

$$t = T - 273,15\text{ °C}$$

$$\text{Lämpötilaero } 1\text{ K} = 1\text{ °C} = T(0,01\text{ °C})/273,16$$

# TERMODYNAMINEN LÄMPÖTILA

ideaalikaasu:  $pV = nRT$

todellinen kaasu: viriaalikertoimet

$$pV = nRT + \left( 1 + \frac{nB_v}{V} + \frac{n^2 C_v}{V^2} + \frac{n^3 D_v}{V^3} + \dots \right)$$

## **Kaasulämpömittari**

-täytyy huomioida että lämpötila ja paine eri osissa vaihtelee (dead space correction)

-lämmönjohtavuudesta johtuvia korjauksia

-hydrostaattisesta paineesta johtuvia korjauksia

NIST (USA), NPL (Englanti), NMI (Hollanti), NML (Australia)

## **Noise thermometry**

## **Nuclear orientation thermometry**

## **Termodynaamiset lämpötilat lämpötilan 273 K alapuolella**

## **Säteilylämpötila**

## **Nanolämpömittari (CBT-mittari)**

# ITS-90 KANSAINVÄLINEN LÄMPÖ- TILA-ASTEIKKO VUODELTA 1990

-kiintopisteet

-sillat ja referenssivastukset

-standardiplatinavastuslämpömittarit (yleensä Pt25)

-lämpötilan 960 °C yläpuolella: infrapunalämpömittarit =  
pyrometrit ja Planckin laki

Taulukko 1 Lämpötila-asteikon ITS-90 kiintopisteet

| Kiintopiste  | Lämpötila<br>(°C)      | Olomuoto                                 |
|--|------------------------|--|
| He   | -270,15 ...<br>-268,15 | höyrynpainepiste                         |
| e-H <sub>2</sub> (H <sub>2</sub> , missä orto- ja paramuodot ovat tasapainossa)        | -259,3467              | kolmoispiste                             |
| e-H <sub>2</sub> tai He (H <sub>2</sub> , missä orto- ja paramuodot ovat tasapainossa) | ≈ -256,15              | höyrynpainepiste (tai kaasulämpömittari) |
| e-H <sub>2</sub> tai He (H <sub>2</sub> , missä orto- ja paramuodot ovat tasapainossa) | ≈ -252,85              | höyrynpainepiste (tai kaasulämpömittari) |
| Ne   | -248,5939              | kolmoispiste                             |
| O <sub>2</sub>   | -218,7916              | kolmoispiste                             |
| Ar   | -189,3442              | kolmoispiste                             |
| Hg   | -38,8344               | kolmoispiste                             |
| H <sub>2</sub> O   | 0,01                   | kolmoispiste                             |
| Ga   | 29,7646                | sulamispiste                             |
| In   | 156,5985               | jähmettymispiste                         |
| Sn   | 231,928                | jähmettymispiste                         |
| Zn   | 419,527                | jähmettymispiste                         |
| Al   | 660,323                | jähmettymispiste                         |
| Ag   | 961,78                 | jähmettymispiste                         |
| Au   | 1064,18                | jähmettymispiste                         |
| Cu   | 1084,62                | jähmettymispiste                         |

- kenno laitetaan uuniin
- uunin lämpötilaa säädetään niin että metalli sulaa
- kun kaikki metalli on sulanut säädetään uunin lämpötila n. 1 °C jähmettymispisteen alle
- kennon keskiosa jäähdytetään metalli- tai kvartsisauvalla
- lämpömittari laitetaan kennoon

Jähmettymisplatoo voi kestää 10-15 h.

## Lämpötila-asteikon matematiikka

Lämpötilan laskemisessa käytetään Pt25-anturin vastussuhdetta

$$W(T_{90}) = \frac{R(T_{90})}{R(273,16 \text{ K})} \quad (1)$$

Tässä  $R(T_{90})$  on anturin vastus lämpötilassa  $T_{90}$  ja  $R(273,16 \text{ K})$  on anturin vastus veden kolmoispisteessä

Lämpötila-alueella 13,8033 K ... 273,16 K on käytössä referenssifunktio  $W_r$  joka määritellään seuraavasti:

$$T_{90} / 273,16 \text{ K} = B_0 + \sum_{i=1}^{15} B_i \left\{ \frac{W_r(T_{90})^{1/6} - 0,65}{0,35} \right\}_i$$

Vakiot  $A_0$ ,  $B_0$ ,  $A_i$  ja  $B_i$  ovat taulukossa 2.

Lämpötila-alueella 0,01 °C ... 961,78 °C on referenssi-funktio:

$$W_r(T_{90}) = C_0 + \sum_{i=1}^9 C_i \left\{ \frac{T_{90} / \text{K} - 754,15}{481} \right\}_i$$

(3a)

Käänteisfunktio, josta saadaan sama lämpötila  $T_{90}$  kuin yhtälöstä (3a) 0,13 mK:n tarkkuudella on:

$$T_{90} / \text{K} - 273,15 = D_0 \left\{ \frac{W_r(T_{90} - 2,64)}{1,64} \right\}_i$$

(3b)

Vakiot  $C_0$ ,  $D_0$ ,  $C_i$  ja  $D_i$  ovat taulukossa 2.

Taulukko 2: Referenssifunktioiden (2), (2a), (3) ja (3a)  
kertoimet  $A_0, B_0, A_i$  ja  $B_i$  sekä  $C_0, D_0, C_i$  ja  $D_i$

|          |             |          |              |          |              |
|----------|-------------|----------|--------------|----------|--------------|
| $A_0$    | -2,13534729 | $B_0$    | 0,183324722  | $B_{13}$ | -0,091173542 |
| $A_1$    | 3,18324720  | $B_1$    | 0,240975303  | $B_{14}$ | 0,001317696  |
| $A_2$    | -1,80143597 | $B_2$    | 0,209108771  | $B_{15}$ | 0,026025526  |
| $A_3$    | 0,71727204  | $B_3$    | 0,190439972  |          |              |
| $A_4$    | 0,50344027  | $B_4$    | 0,142648498  |          |              |
| $A_5$    | -0,61899395 | $B_5$    | 0,077993465  |          |              |
| $A_6$    | -0,05332322 | $B_6$    | 0,012475622  |          |              |
| $A_7$    | 0,28021362  | $B_7$    | -0,032267127 |          |              |
| $A_8$    | 0,10715224  | $B_8$    | -0,075291522 |          |              |
| $A_9$    | -0,29302865 | $B_9$    | -0,056470670 |          |              |
| $A_{10}$ | 0,04459872  | $B_{10}$ | 0,076201285  |          |              |
| $A_{11}$ | 0,11868632  | $B_{11}$ | 0,123893204  |          |              |
| $A_{12}$ | -0,05248134 | $B_{12}$ | -0,029201193 |          |              |
| $C_0$    | 2,78157254  | $D_0$    | 439,932854   |          |              |
| $C_1$    | 1,64650916  | $D_1$    | 472,41820    |          |              |
| $C_2$    | -0,1371430  | $D_2$    | 37,684494    |          |              |
| $C_3$    | -0,00649767 | $D_3$    | 7,472018     |          |              |
| $C_4$    | -0,00234444 | $D_4$    | 2,920828     |          |              |
| $C_5$    | 0,00511868  | $D_5$    | 0,005184     |          |              |
| $C_6$    | 0,00187982  | $D_6$    | -0,963 864   |          |              |
| $C_7$    | -0,00204472 | $D_7$    | -0,188 732   |          |              |
| $C_8$    | -0,00046122 | $D_8$    | 0,191 203    |          |              |
| $C_9$    | 0,000457 24 | $D_9$    | 0,049 025    |          |              |

## Lämpötila-asteikon ITS-90 interpolointifunktio argonin kolmoispisteestä veden kolmoispisteeseen

Vastusanturi kalibroidaan argonin kolmoispisteessä (83,8054 K), elohopean kolmoispisteessä (234,3156 K) ja veden kolmoispisteessä (273,16 K).

Poikkeamafunktio on:

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1] \ln W(T_{90})$$

Kertoimet  $a$  ja  $b$  lasketaan kiintopistekalibroinnin tuloksista (kaksi  $W(T_{90})$ -arvoa,  $W_r$  on tiedossa kiintopisteissä, kaksi yhtälöä).

## Lämpötila-asteikon ITS-90 interpolointifunktio lämpötila-alueella 0,01 °C ... hopean jähmettymispiste

Vastusanturi kalibroidaan veden kolmoispisteessä (0,01 °C) sekä tinan (231,928 °C), sinkin (419,527 °C), alumiinin (660,323 °C) ja hopean jähmettymispisteessä (961,78 °C).

Poikkeamafunktio on tällöin

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]^2 + c[W(T_{90}) - 1]^3 + d[W(T_{90}) - W(660,323 \text{ °C})]^2 \quad (5)$$

Lämpötilan ollessa alhaisempi kuin  $660,323\text{ °C}$  on  $d = 0$ , ja kertoimet  $a$ ,  $b$   $c$  lasketaan yhtälöstä 5 (kolme kalibrointipistettä: tina, sinkki, alumiini  $\rightarrow$  kolmen yhtälön ryhmä). Lämpötilan ollessa korkeampi kuin  $660,323\text{ °C}$  käytetään vielä kerrointa  $d$ , joka lasketaan hopeapisteestä käyttäen kertoimien  $a$ ,  $b$  ja  $c$  arvot.

Miten lasketaan lämpötila kiintopisteiden välissä, kun kalibrointikertoimet ovat tiedossa?

Käytetään ensin yhtälöä (5) arvon  $W_r$  laskemiseksi. Kertoimet  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  ja  $W(T_{90})$  tunnetaan. Sitten lasketaan lämpötila yhtälöstä (3b), tai iteroidaan se yhtälöstä (3).

Asteikossa on useampia ala-alueita:

vesi, tina, sinkki  
vesi, tina  
vesi, indium  
vesi, gallium  
elohopea, vesi, gallium

Tavallisimmat kalibroinnit:

vesi, sinkki, vesi, tina, vesi, elohopea, vesi, argon, tai  
vesi, alumiini, vesi, sinkki, vesi, tina, vesi.

Kaikki vastuslämpömittarit eivät kestä lämpötilaa 660 °C, ja vain erikoisrakenteiset anturit kestävät 960 °C. Epästabiilin anturin vastus veden kolmoispisteessä muuttuu tällöin huomattavasti (5 mK – 10 mK). Hopea kontaminoi antureiden platinalankoja.

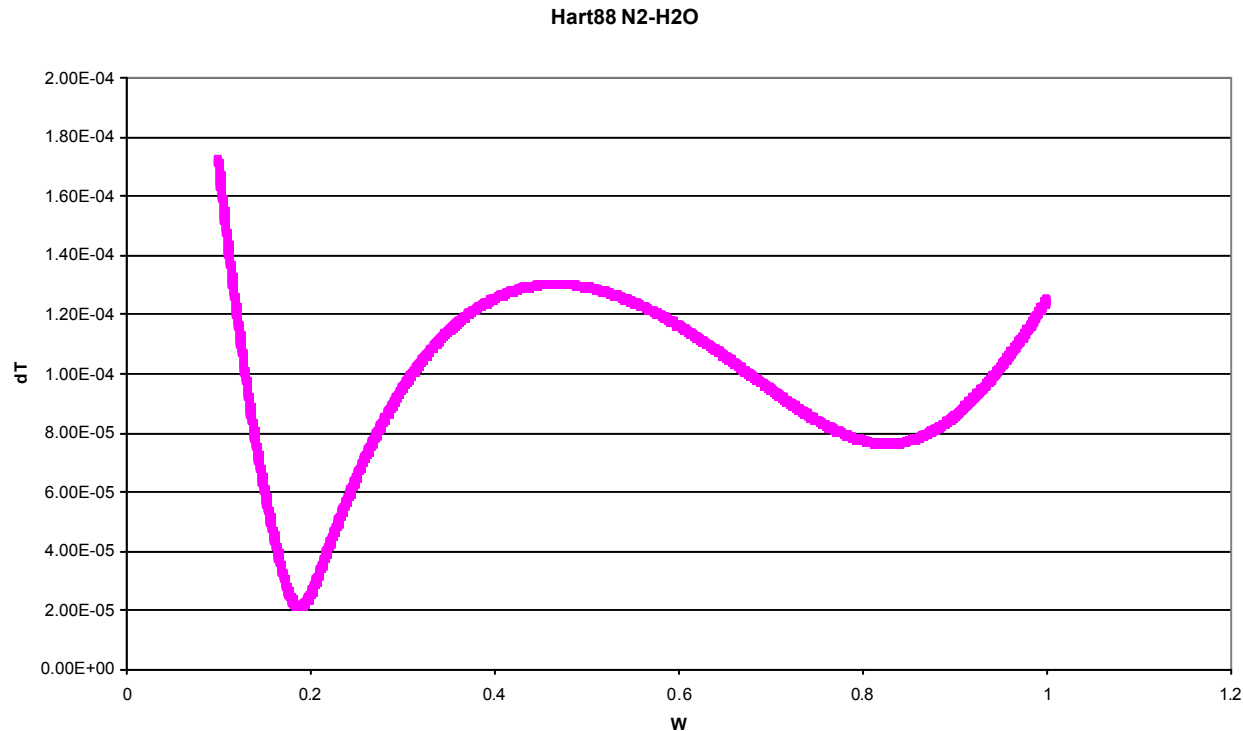
Kiinalaiset osaavat tehdä hyviä antureita. MIKES käyttää englantilaisia ja japanilaisia antureita. Vastusanturin hinta on n. 5000 €, ja kalibrointi maksaa lähes saman verran.

Silta on kallis, n. 50000 €, ja kiintopistekennot maksavat 15000 €/kpl.

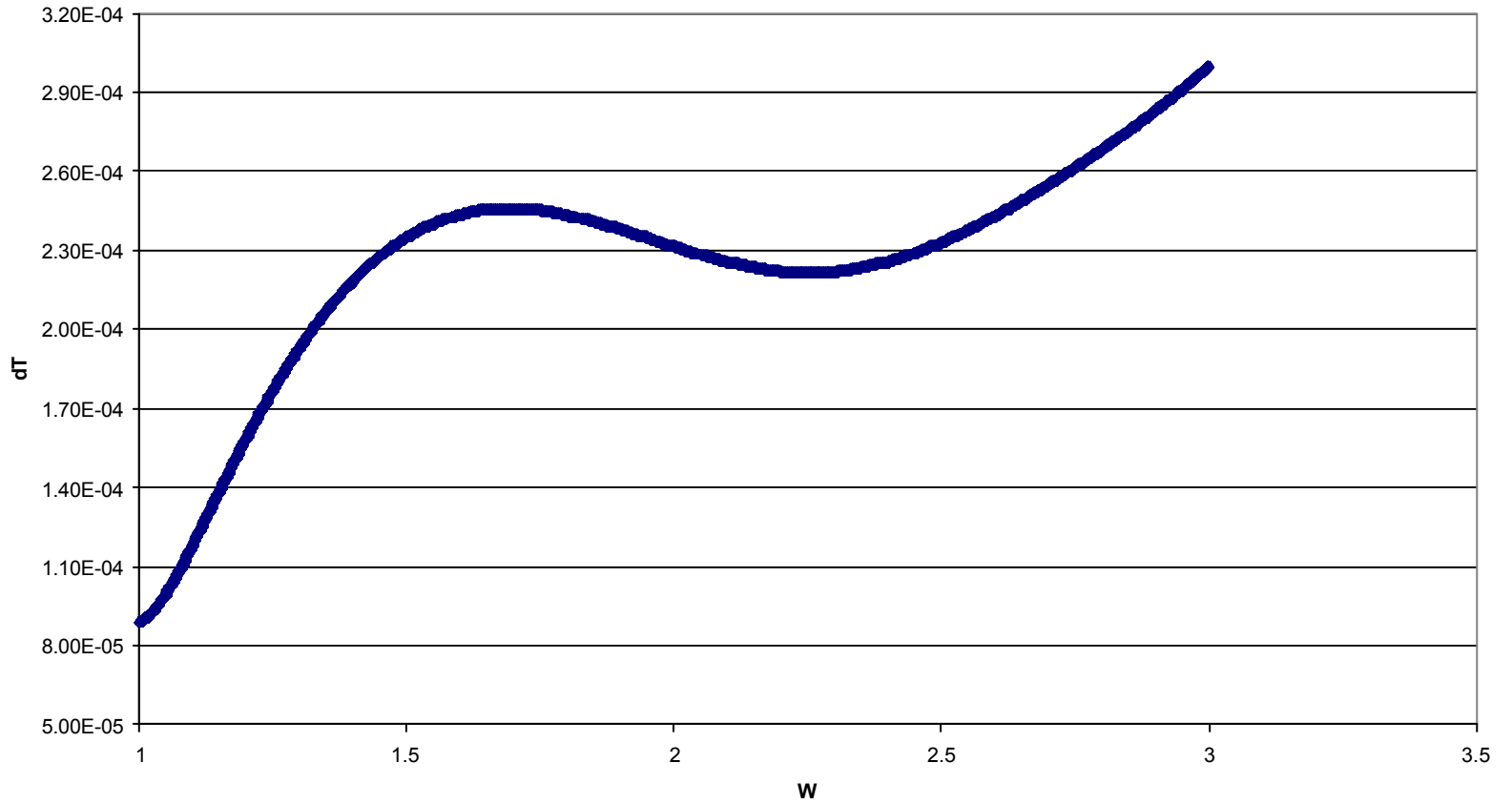
MIKESillä on kolme siltaa, DC-silta ja AC-silta kiintopistekalibrointiin, ja AC-silta rutiinikalibrointiin. Rutiinikalibrointi suoritetaan nestehauteissa (alkoholihaude  $-80\text{ °C} \dots +15\text{ °C}$ ), vesihaude ( $15\text{ °C} \dots 85\text{ °C}$ ) ja öljyhaude ( $85\text{ °C} \dots 300\text{ °C}$ ). Lisäksi kalibroidaan termoelementtejä uuneissa ( $300\text{ °C} \dots 1600\text{ °C}$ ).

## Kiintopistekalibroinnin epävarmuudet

Kiintopistekalibroinnin tulos eli eri kiintopisteiden tuottamat  $W$ -arvot riippuvat kaikki vastusanturin epävarmuudesta veden kolmoispisteessä. Alla olevassa käyrässä on mukana tämä epävarmuuskomponentti, eri kiintopisteiden tuottaman lämpötilan epävarmuus sekä sillan ja referenssivastuksen epävarmuus.



### Hart 88 H2O-AI



## Hopeapisteen yläpuolella käytetään Planckin lakia lämpötilan ekstrapolointiin

Lämpötila-asteikko ITS-90 käyttää hopeapisteen yläpuolella seuraavaa funktiota:

$$\frac{L_{\lambda}(T_{90})}{L_{\lambda}[T_{90}(X)]} = \frac{e^{c_2[\lambda T_{90}(X)]^{-1}} - 1}{e^{c_2[\lambda T_{90}]^{-1}} - 1} \quad (6)$$

missä  $T_{90}(X)$  on joko hopeapisteen, kultapisteen tai kuparipisteen lämpötila (huom. absoluuttinen lämpötila).  $L_{\lambda}(T_{90})$  on kiintopisteen (mustan kappaleen säteilijän) radianssi aallonpituudella  $\lambda$  (vakuumissa) lämpötilassa  $T_{90}$ , ja  $L_{\lambda}(T_{90}(X))$  on vastaava radianssi lämpötilassa  $T_{90}(X)$ .  
 $c_2 = 0,014388 \text{ m}\times\text{K}$ .

Yhtälö (6) ei ole käytettävissä laajakaistapyrometerille, ainostaan ns. referenssipyrometreille jossa on interferenssi-suodatin jonka puoliarvoveveys on 10 nm aallonpituuden ollessa 650 nm tai 900 nm.

Jotkut laajakaistapyrometrit seuraavat Sakuma-kaavaa (jonka ja aikaisemmin keksi Berliinissä Jung).

$$V(T) = \frac{C}{\exp\left(\frac{c_2}{AT + B}\right) - 1} \quad \text{missä } c_2 \text{ on sama kuin}$$

Planckin kaavassa. Vakiot  $A$ ,  $B$  ja  $C$  määritellään kalibroinnin avulla.  $V$  on pyrometrin outputsignaali.

Huom: Kaavassa (6) oleva aallonpituus ei ole vakio, se muuttuu lämpötilan mukaan.

## Viitteet:

1. H. Preston-Thomas, The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90), *Metrologia* 27 (1990) 3-10
2. R. L. Rusby, R.P. Hudson and M. Durieux, Revised Values for  $(t_{90} - t_{68})$  from 630 °C to 1064 °C, *Metrologia* 31 (1994) 149-153
3. F. Sakuma and S. Hattori, in *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, Vol. 5, 1982, 535
4. H.J. Jung und J. Verch, Ein Rechenverfahren zur Auswertung pyrometrischer Messungen, *Optik, Sonderdruck* 38, Band (1973), 95-100

MIKESin lämpötilakalibroinnin jäljitettävyyys tulee ITS-90-asteikosta (kiintopistekennot). Lämpötilalaboratorio on siten ns. primäärilaboratorio.

Esim. Islannissa ei ole lämpötilan primäärilaboratoriota, sillä jälki tulee Englannista, eli Reykjavikistä viedään vastanturi kalibroitavaksi Englantiin. Tästä anturista tulee sitten Islannin referenssimittari.

Lämpötilan primäärilaboratorioissa pitää olla kiintopistekennot, muu laitteisto ja koulutettu henkilökunta.

Jotta jokaisessa maassa ei olisi oma lämpötila-asteikko järjestetään EUROMET-organisaation puitteissa eurooppalaisia vertailumittauksia kansallisille lämpötilalaboratorioille. Vuosina 1990 - 2002 on MIKES osallistunut vertailuihin missä on ollut veden kolmoispistekennoja, sinkki-, tina-, indium-, elohoea ja argonkennoja sekä pyrometrejä ja pintalämpömittareita.

Nykyään vaaditaan maailmanlaajuisista kontrollia, josta syystä vertailut tarvitsevat paljon aikaa, ja tulokset tulevat monta vuotta mittauksen jälkeen. Näitä mittauksia kutsutaan avainvertailuiksi. Kaikki hyväksytyt tulokset syötetään BIPM:n tietokantaan, joka on Internetissä. (BIPM = kansainvälinen mitta- ja paino- toimisto)

Useimmissa maissa on jäljitettävyyshetket, jotka siirtävät mittanormaalilaboratorion ylläpitämä ITS-90 akkreditoituille kalibrointilaboratorioille ja muille asiakkaille. Suomessa on tällä hetkellä 4 akkreditoitua lämpötilan kalibrointilaboratoriota. Niiden toimintaa valvoo MIKESin akkreditointiyksikkö. Akkreditoitujen laboratorioiden tehtävänä on lämpötila-asteikon siirtäminen teollisuudelle. Myös akkreditoituille kalibrointilaboratorioille järjestetään kansallisia tai kansainvälisiä vertailumittauksia.

# LÄMPÖTILAN MITTAUS

Nesteiden lämpötila on yleensä helppo mitata, koska lämpömittari saa hyvän lämpökontaktin nesteeseen.

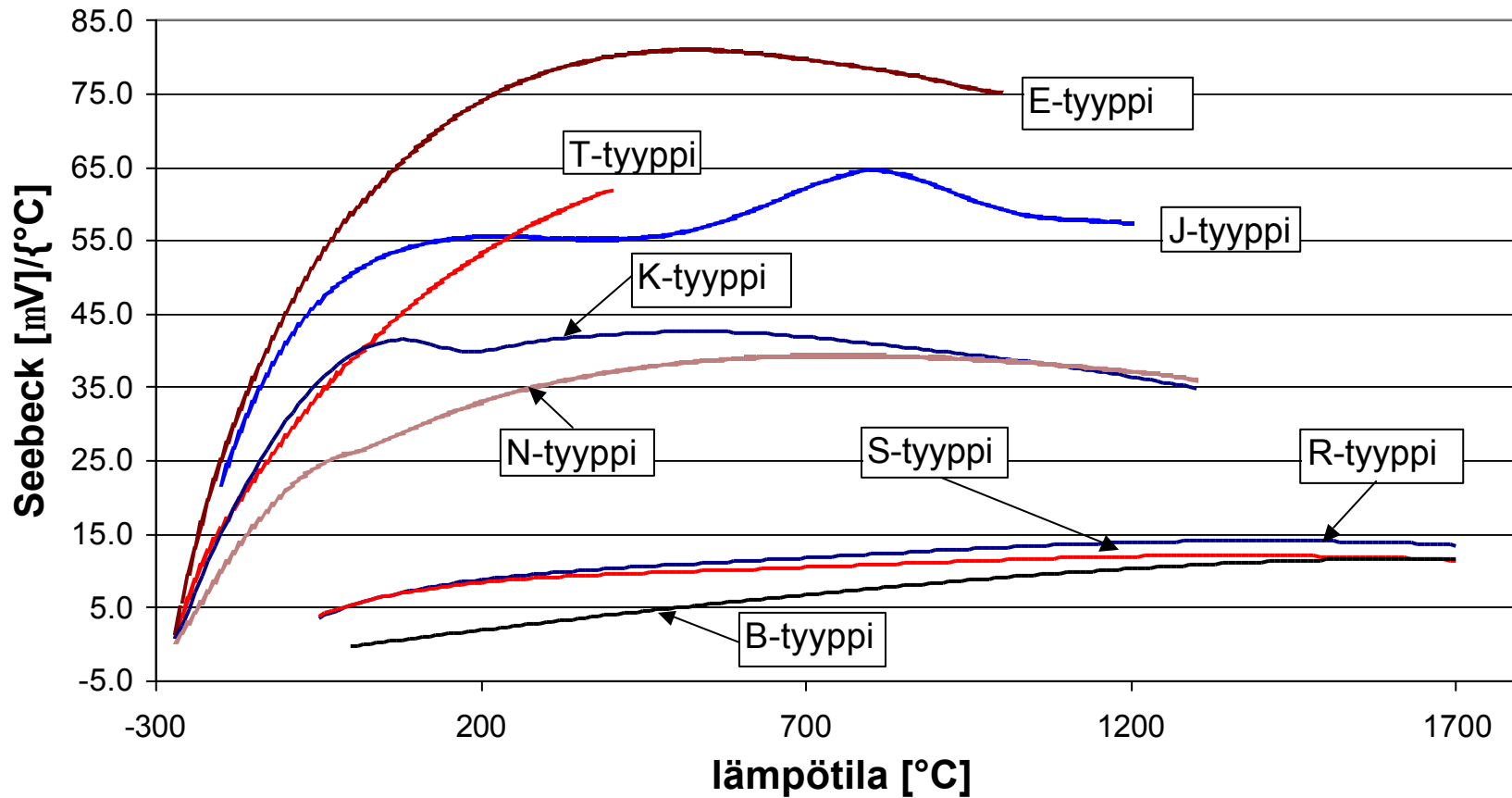
Tarkimmat lämpömittarit ovat kiintopistekalibroidut vastuslämpömittarit (Pt25). Jos nesteen lämpötila on vakio mitattavassa kohteessa on mittauksen epävarmuus luokkaa 5 mK – 10 mK. Huom: tällaisia lämpömittareita ei saisi korkeissa lämpötiloissa käyttää vaakasuorassa asennossa.

Nesteiden lämpötilaa voidaan mitata muillakin vastusantureilla, *Pt100-antureilla*. Nykyään löytyy erittäin stabiileja Pt100-antureita. Usein Pt100-anturi on liitetty digitaaliseen lämpötilanäyttöön.

IEC 751-standardin mukaan Pt100-anturin lämpötila lasketaan kaavasta  $R = R_0 \times (1 + At + Bt^2)$ , kun  $t > 0$  °C.

*Termoelementti*: kytketään jännitemittariin ja haetaan jännitettä vastaava lämpötila luettelosta, tai vaihtoehtoisesti kytketään se digitaalimittariin, missä on lämpötilanäyttö. Käyttöalue huoneen lämpötilasta lämpötilaan 2000 °C.

## Seebeck arvot

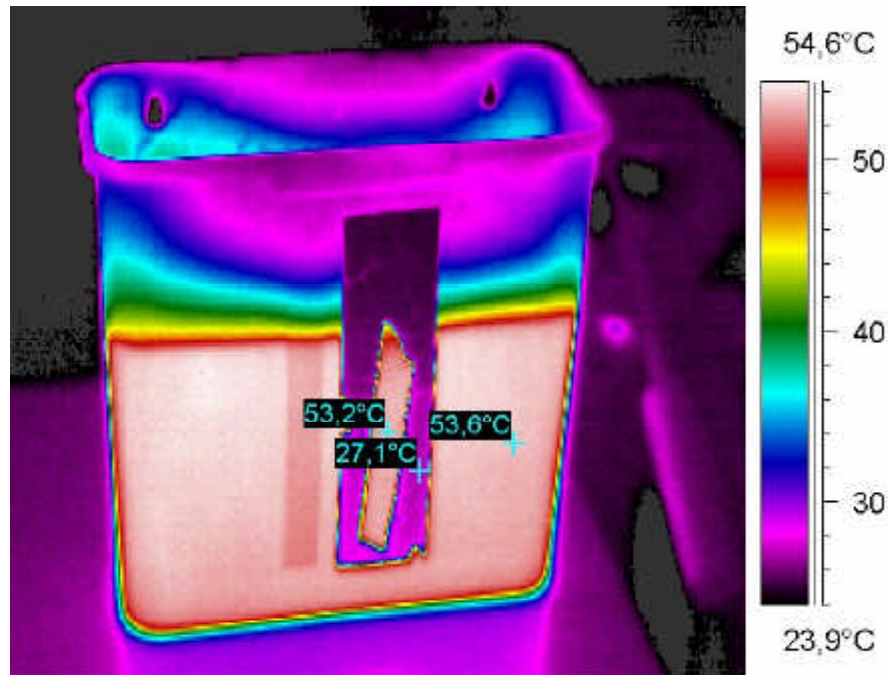


*Pintalämpötilan* mittaaminen tapahtuu pyrometrillä (infrapuna-  
lämpömittarilla).

Korkeat lämpötilat ( $> 500\text{ °C}$ ): esim. piidetektorit, sopiva optiikka

Matalat lämpötilat: ( $-50\text{ °C} \dots 500\text{ °C}$ ) esim. InGaAs-  
detektorit, sopiva optiikka

Emissiivisyys riippuu mitattavasta materiaalista, sen pinta-  
rakenteesta, lämpötilasta, käytetystä aallonpituudesta ja py-  
rometrin ja pinnan välisestä kulmasta.



Mittausvirhe (°C) kun emissiivisyydessä on 1 % virhe

|                                    |      |     |      |      |      |      |      |      |      |      |                   |
|------------------------------------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------------|
| keski-<br>aallon-<br>pituus<br>/μm | 0,65 | 0,9 | 1,64 | 2,3  | 3,4  | 3,9  | 4,5  | 5,0  | 7,9  | 10,6 | 0,78<br>-<br>1,06 |
| lämpö-<br>tila (°C)                |      |     |      |      |      |      |      |      |      |      |                   |
| -50                                |      |     |      |      |      |      |      |      | 1,8  | 1,3  |                   |
| 0                                  |      |     |      |      |      |      |      |      | 0,3  | 0,3  |                   |
| 50                                 |      |     |      | 0,1  | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,2  |                   |
| 100                                |      |     | 0,2  | 0,2  | 0,3  | 0,3  | 0,4  | 0,4  | 0,5  | 0,6  |                   |
| 200                                |      |     | 0,3  | 0,4  | 0,5  | 0,6  | 0,7  | 0,8  | 1,1  | 1,2  |                   |
| 300                                |      |     | 0,4  | 0,5  | 0,8  | 0,9  | 1,0  | 1,1  | 1,6  | 1,9  |                   |
| 400                                |      | 0,3 | 0,5  | 0,7  | 1,1  | 1,2  | 1,4  | 1,5  | 2,2  | 2,6  |                   |
| 500                                |      | 0,4 | 0,7  | 1,0  | 1,4  | 1,6  | 1,8  | 2,0  | 2,9  | 3,3  |                   |
| 750                                |      | 0,7 | 1,1  | 1,7  | 2,5  | 2,8  | 3,1  | 3,4  | 4,7  | 5,3  | 12,2              |
| 1000                               | 0,7  | 1,1 | 1,7  | 2,5  | 3,7  | 4,1  | 4,6  | 5,0  | 6,7  | 7,4  | 15,3              |
| 1500                               | 1,4  | 1,8 | 2,7  | 4,3  | 6,2  | 6,7  | 7,4  | 7,9  | 10,1 | 10,9 | 21,3              |
| 2000                               | 2,3  | 3,3 | 4,8  | 7,6  | 10,4 | 11,2 | 12,1 | 12,8 | 15,5 | 16,5 | 33,1              |
| 2500                               | 3,5  | 4,9 | 6,9  | 10,8 | 14,3 | 15,2 | 16,3 | 17,1 | 20,2 | 21,2 | 45,4              |
| 3000                               | 4,8  | 6,7 | 9,3  | 14,3 | 18,4 | 19,5 | 20,7 | 21,6 | 24,9 | 26,0 | 59,9              |

Pyrometrejä käytetään esim. metalliteollisuudessa, paperiteollisuudessa ja elintarviketeollisuudessa.

**MIKES** *Pintalämpömittari* koostuu termoelementistä tai Pt100-anturista, joka on liitetty digitaaliseen lämpötilanäyttöön.)

# MITTAUKSEN EPÄVARMUUS

Jokaisessa mittaustuloksessa on mittausepävarmuus, johon vaikuttaa mitattava kohde, mittausolosuhteet mittauslaitteisto ja mittaaja. Laitteiston epävarmuus saa lähettämällä laitteet akkreditoidulle kalibrintilaboratoriolle.

Kalibroinnissa ei yleensä tehdä säätöjä, vaan katsotaan paljonko laitteen mittaustulos poikkeaa oikeasta arvosta. Laitetta käytettäessä tulisi ottaa tämä poikkeama huomioon

Esimerkki: Mitataan nesteen lämpötila kalibroidulla digitaalilämpömittarilla, johon on liitetty Pt100-anturi.

Anturi on upotettu nesteeseen sille syvyydelle mikä kalibrointitodistuksessa on mainittu (syy: anturin lämmönjohtavuus).

Digitaalilämpömittari on laitettu päälle 24 h aikaisemmin, jotta elektroniikan lämpötila olisi tasaantunut. Lämpömittarin lukemaa luetaan 10 kertaa 10 s välein. Mittaustulokset kirjoitetaan paperille tai syötetään taulukkolaskentaohjelmaan.

Mittaustulokset ovat:

| mittaus#                      | lämpömittarin lukema (°C) |
|-------------------------------|---------------------------|
| 1                             | 35,02                     |
| 2                             | 35,03                     |
| 3                             | 35,01                     |
| 4                             | 35,01                     |
| 5                             | 35,02                     |
| 6                             | 34,99                     |
| 7                             | 35,01                     |
| 8                             | 35,02                     |
| 9                             | 35,00                     |
| 10                            | 35,01                     |
| keskiarvo                     | 35,01                     |
| keskiarvon standardipoikkeama | 0,011                     |

Mittarin korjaus (kalibrointitodistuksessa) on 0,04 °C. Tämä ynnätään keskiarvoon, jolloin mittaustulokseksi saadaan 35,05 °C.

Muut epävarmuustekijät:

- mittarin kalibrointiepävarmuus
- nesteen lämpötilagradientit
- digitaalinäytön resoluutio

| epävarmuustekijä          | arvo  |
|---------------------------|---|
| standardipoikkeama        | 0,011 °C  |
| kalibrointi epävarmuus    | 0,02 °C   |
| nesteen gradientit        | 0,05 °C   |
| mittarin resoluutio       | 0,001 °C  |
| <i>kokonaisepävarmuus</i> | $\sqrt{(0,011^2 + 0,02^2 + 0,05^2 + 0,001^2)}$ °C = 0,06 °C |

Kokonaisepävarmuus kerrotaan kattavuuskertoimella 2, mikä vastaa normaalihajonnalle 95 % vaihteluväliä. *Lajennettu epävarmuus* on siten  $2 \times 0,06 \text{ °C} = 0,12 \text{ °C}$ . Lopputulokseksi saadaan: nesteen lämpötila oli **35,05 °C ± 0,12 °C**.

# TUTKIMUS

eutektiset kiintopisteet pyrometrialueelle: esim. Rh-C (1657 °C), Pt-C (1737 °C), Re-C (2474 °C)

lämpötila-asteikon laajentaminen kohti absoluuttista nollaa (ITS-XX)

korkean lämpötilan termoelementit (W/Rh)

platina-palladium termoelementit

filteriradiometrillä toteutettu lämpötila-asteikko ja ITS90

Pt25-antureiden parantaminen