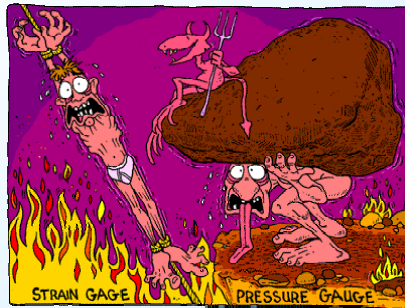


# Mittaustekniikan perusteet / luento 10

## Antureita

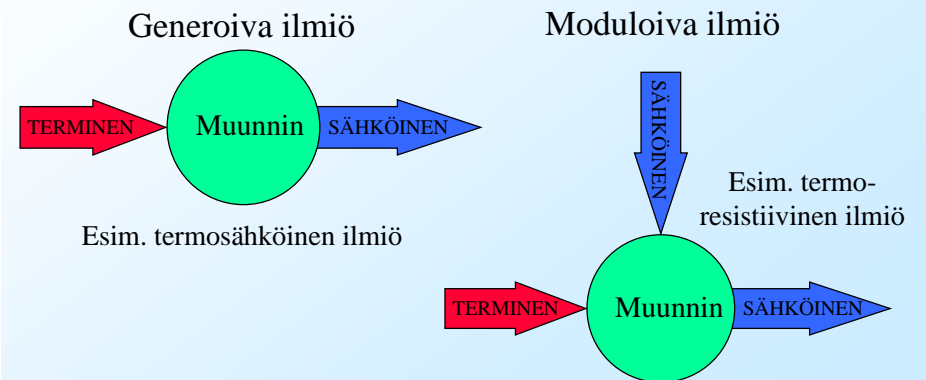


*Anturi*  
Mittauslaitteen tai mittausketjun elementti, johon mittaussuure vaikuttaa välittömästi

Antureista lisää:  
S-108.3010 Mittauselektronikka

## Anturit

- Anturi muuttaa mitattavan suureen helpommin käsiteltävään, yleensä sähköiseen, muotoon.
- Anturitekniikka hyödyntää laajasti fysiikan eri ilmiöitä.

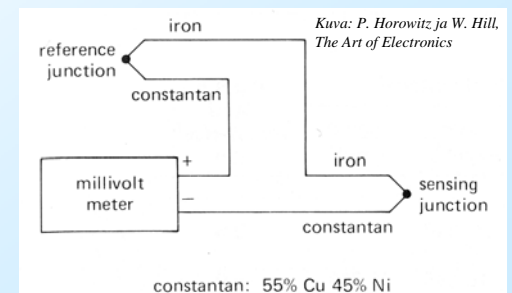


## Antureita tällä luennolla

- Lämpö
  - Vastusanturi, termistori, termopari ja pyrometri.
- Valo
  - Valodiodi ja valomonistinputki.
- Paine
  - Bourdon-putki ja kalvoanturi.
- Voima, liike ja muodonmuutos
  - Pietsoanturi, differentiaalimuuntaja ja venymäliuska.
- Virtaus
  - Paine-eroanturi, magneettinen anturi ja turbiinianturi.

## Lämpö: termopari

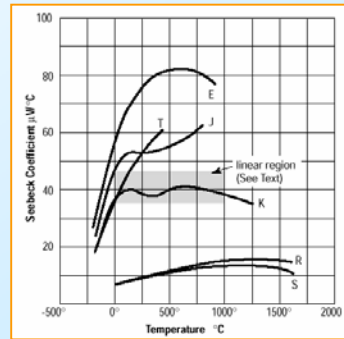
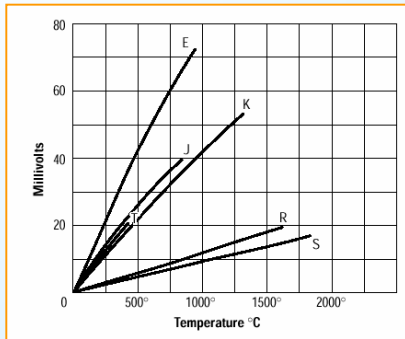
- Termopari
  - Toiminta perustuu **Seebeck-ilmiöön**
    - Ilmiö: kahden eri johteen väliset liitokset aiheuttavat termojännitteen, mikäli niitä pidetään eri lämpötiloissa.
    - Ilmiön keksi saksalainen fyysikko Thomas Seebeck v. 1821.
    - Yleiskäyttöisin lämpötila-anturi
  - Termojännitteen suuruusluokka n.  $1-100 \mu\text{V} / ^\circ\text{C}$ .



## Lämpö: termopari

Termojännite  $V$  riippuu liitosten lämpötilaerosta  $T_{J1} - T_{ref}$  ja Seebeck-kertoimesta  $\alpha : V = \alpha(T_{J1} - T_{ref})$ . Laajemmalla lämpötila-alueella  $\alpha$  riippuu lämpötilasta, eikä yhtälö ole lineaarinen  $\rightarrow$  mallinnetaan  $N$ :nen asteen polynomilla, jonka kertoimet  $C_i$  saadaan taulukosta.

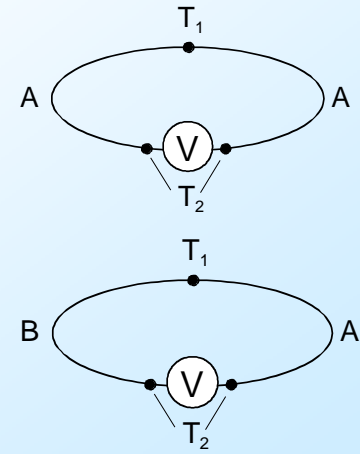
$$T_{J1} - T_{ref} = C_0 + C_1V + C_2V^2 + \dots + C_NV^N$$



Kuvat:  
Agilent

## Lämpö: termopari

- Johtimet samaa materiaalia  
 $\rightarrow$  sama termojännite  $\rightarrow$  ei havaittavaa jännitettä
- Johtimet eri materiaalia  
 $\rightarrow$  eri termojännite  $\rightarrow$  termojännitteiden ero on mitattavissa
- Termojännitteiden ero riippuu materiaalivalinnoista



## Lämpö: termopari

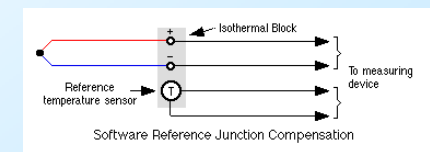
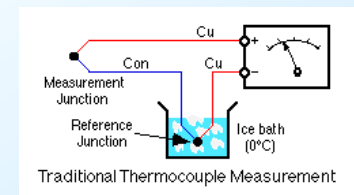
Type	Alloy	Max temp <sup>a</sup> (°C)	Tempco @20°C (µV/°C)	Output voltage <sup>b</sup>			30 gauge lead resistance <sup>c</sup> (Ω)
				100°C (mV)	400°C (mV)	1000°C (mV)	
J	{Iron {Constantan <sup>d</sup>	760	51.45	5.268	21.846	—	3.6
K	{Chromel <sup>e</sup> {Alumel <sup>f</sup>	1370	40.28	4.095	16.395	41.269	6.0
T	{Copper {Constantan <sup>d</sup>	400	40.28	4.277	20.869	—	3.0
E	{Chromel <sup>e</sup> {Constantan <sup>d</sup>	1000	60.48	6.317	28.943	76.358	7.2
S	{Platinum {90%Pt-10%Rh	1750	5.88	0.645	3.260	9.585	1.9
R	{Platinum {87%Pt-13%Rh	1750	5.80	0.647	3.407	10.503	1.9
B	{94%Pt-6%Rh {70%Pt-30%Rh	1800	0.00	0.033	0.786	4.833	1.9

<sup>(a)</sup> thermocouple life is shortened by prolonged operation near maximum temperature. <sup>(b)</sup> reference junction at 0°C. <sup>(c)</sup> per double foot; for 24-gauge, multiply values by 0.25. <sup>(d)</sup> 55%Cu-45%Ni. <sup>(e)</sup> 90%Ni-10%Cr. <sup>(f)</sup> 96%Ni-2%Mn-2%Al.

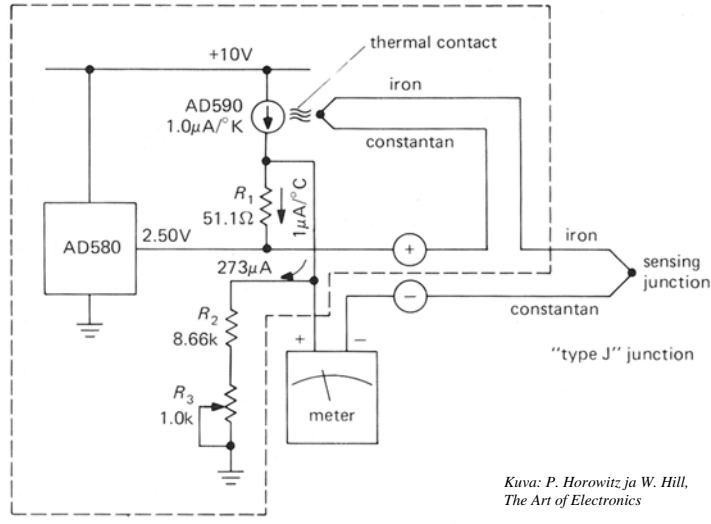
Kuva: P. Horowitz ja W. Hill, The Art of Electronics

## Lämpö: termopari

- Koko piirin ulostulojännite riippuu kahden liitoksen lämpötilaerosta
  - Toinen liitoksista on pidettävä vakio- $\rightarrow$  lämpötilassa
  - Vaihtoehtoisesti on suunniteltava elektroniikka, joka ottaa referenssiliitoksen lämpötilan huomioon (tähän löytyy valmiita piirejä ja kytkentöjä)
  - Kompensointia voi tehdä myös ohjelmallisesti

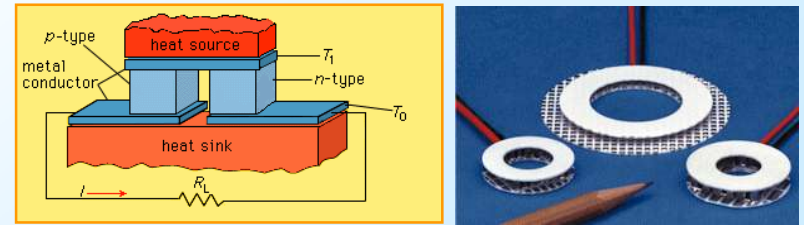


## Lämpö: termopari



## Peltier-ilmio (termosähköinen ilmiö)

- Kahden eri johteen muodostamista liitoksista toinen lämpenee ja toinen jäähtyy, kun niiden läpi johdetaan sähkövirta.
  - Voimakas erityisesti puolijohteilla (p- ja n-tyyppi).
  - Ilmiön keksi ranskalainen fyysikko Jean-Charles-Athanase Peltier vuonna 1834.
  - Peltier-elementtiä käytetään yleisesti lämpötilan säätöön.



## Lämpö: termopari

- Huomioi mittauksia tehtäessä
  - Referenssipisteen lämpötila
  - Termojännitteen epälineaarinen riippuvuus lämpötilasta
  - Termoparin mittajohdot:
    - Väsymismurtumat, epäpuhtaudet
    - Termoparin huono liitos
    - Galvaaniset jännitteet
  - Lämpövastus ympäristöön
  - Sähköiset häiriöt



## Lämpö: vastusanturi

- Vastusanturit
  - Perustuvat metallin resistanssin (melko lineaariseen) lämpötilariippuvuuteen:

$$R_T = R_0 + R_0 \alpha \left[ T - \delta \left( \frac{T}{100} - 1 \right) \left( \frac{T}{100} \right) - \beta \left( \frac{T}{100} - 1 \right) \left( \frac{T^3}{100} \right) \right]$$

$R_T$  = resistanssin arvo lämpötilassa  $T$  [°C]  
 $R_0$  = resistanssin arvo lämpötilassa  $T = 0$  °C

Mallinnus voidaan tehdä monella tavoin

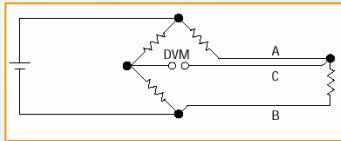
- Stabiilein lämpötila-anturi
- Yleisimmin käytetty anturimateriaali on **Platina**.
  - $\alpha$  = lämpötilakerroin (0.00392  $\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$ )
  - $\delta = 1.49$
  - $\beta = 0$  ( $T > 0$ ),  $\beta = 0.11$  ( $T < 0$ )
- Pt-100 anturi: ominaisresistanssi 100  $\Omega$  (@0 °C)

## Lämpö: vastusanturi

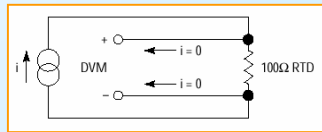
- Resistanssin mittaaminen

- Vastusarvo tyypillisesti 10 Ω - 1000 Ω johdinresistanssit (lämpötilariipuvia) ja liitosresistanssit merkittäviä
- Suora vastusmittaus on vaikeaa → nelijohdinmittaus tai siltamittaus

Kolmijohdinsilta



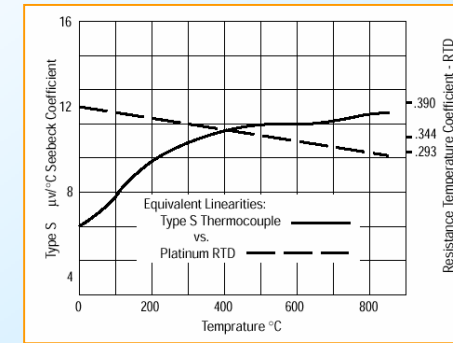
Nelijohdinmittaus



## Lämpö: vastusanturi

- Huomioi mittauksia tehtäessä

- Mittausvirran vaikutus (tyypillisesti 0.5 °C/mW ilmassa)
- Mittuspiirin termojännitteet (Seebeck-ilmiö)
- Anturin lämpövastus ympäristöön
- Lämpötilariippuvuuden epälineaarisuus



Kuva: Agilent

## Lämpö: termistori

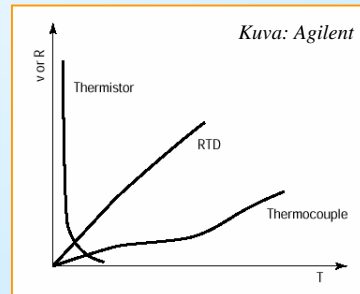
- Termistorit

- Perustuvat puolijohteen resistanssin riippuvuuteen lämpötilasta
- Herkin lämpöanturi: vastusarvon muutos tyypillisesti noin 4% / °C
- Vaste on voimakkaasti epälineaarinen:

$$\frac{1}{T} = A + B(\ln R) + C(\ln R)^3$$

$T$  = lämpötila Kelvineissä  
 $R$  = termistorin resistanssi  
 $A, B, C$  = anturivakioita

Mallinnus voidaan tehdä monella tavoin

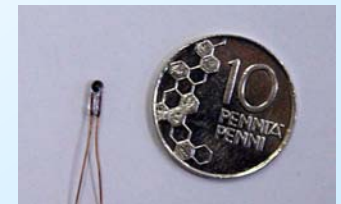


Kuva: Agilent

## Lämpö: termistori

- Huomioi mittauksia tehtäessä

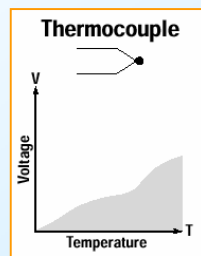
- Termistorin ominaisuudet voivat muuttua pysyvästi, jos sen lämpötila kasvaa liian korkeaksi
- Lämpötila-alue rajoittuu pariin sataan asteeseen
- Termistorit voidaan tehdä erittäin pieniksi
  - Nopeita, mutta
  - Mittausvirran vaikutus suuri
- Termistorin lämpötilariippuvuus voi olla positiivinen tai negatiivinen
  - NTC (Negative Temperature Coefficient)
  - PTC (Positive Temperature Coefficient)



## Lämpöanturit: yhteenveto

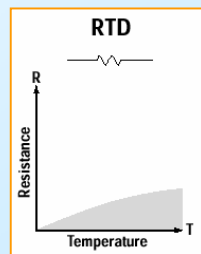
### Termopari:

- + laaja lämpötila-alue
- + yksinkertainen, kestävä ja halpa
- epälineaarinen ja epästabiili
- epäherkkä → matala jännite
- tarvitsee lämpöreferenssin



### Vastusanturi:

- + tarkin ja stabiilein
- + melko lineaarinen
- kallis
- hidras
- tarvitsee monimutkaisen mittaussäätelyn

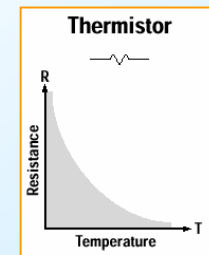


Kuvat: Agilent

## Lämpöanturit: yhteenveto

### Termistori:

- + herkkä ja nopea
- + yksinkertaisempi mittaussäätely kuin vastusantureilla
- rajoitettu lämpötila-alue
- helposti särkyvä
- mittausvirran lämpövaikutus usein merkittävä
- epästabiili ja epälineaarinen

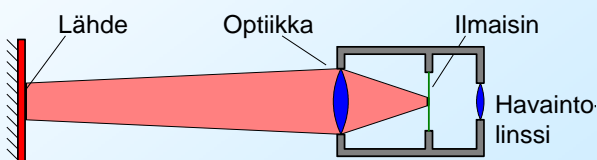


Signaalitasot lämpötilamittauksissa ovat usein matalia. Tämän vuoksi täytyy kiinnittää erityistä huomiota mittaukseen vaikuttaviin häiriöihin.

Kuva: Agilent

## Lämpö: pyrometri

- Toiminta perustuu mustan kappaleen säteilylakiin (Planckin laki).
- Käytetään (yleensä) korkeiden lämpötilojen mittaukseen, koska kappaleen säteilyteho on verrannollinen lämpötilan neljänteen potenssiin (Stefan-Boltzmannin laki).
- Etu: mittauslaite ei kosketa kohdetta.



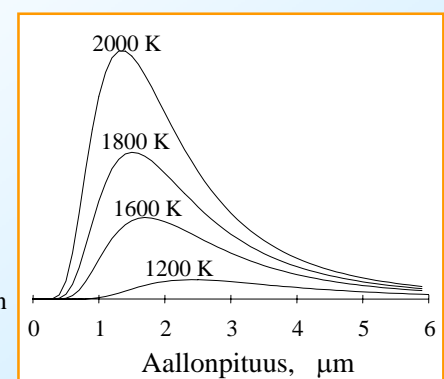
## Lämpö: pyrometri

### Planckin laki

- Määrittelee mustan kappaleen säteilyn (teho / pinta-ala / aallonpituus).

$$F(\lambda) = \frac{1}{\lambda^5} \frac{hc^2}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

$h$  = Planckin vakio,  $k$  = Boltzmannin vakio ja  $c$  = Valon nopeus



### Stefan-Boltzmannin laki

- Määrittää kokonaissäteilytehon pinta-alaa kohti.

$$F = \varepsilon \sigma T^4$$

$\varepsilon$  = Emissiviteetti

$\sigma$  = Stefan-Boltzmannin vakio

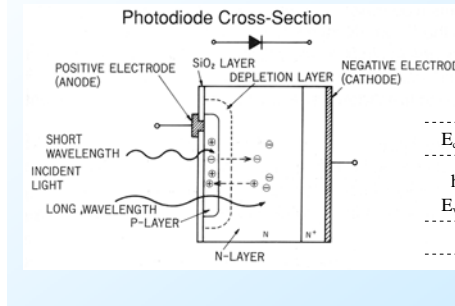
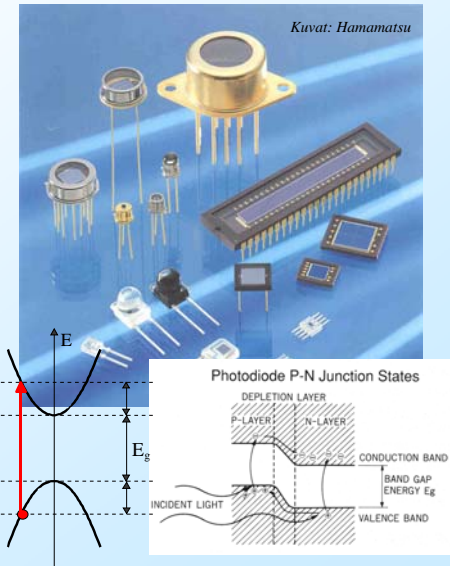


# Valo

- Yhä useampia suureita mitataan nykyisin optisesti:
  - Esim. pituutta, nopeutta, kemiallista koostumusta...
- Anturityypit:
  - Termiset anturit
    - Mittaavat sähkömagneettisen säteilyn tehoa.
    - Suhteellisen hitaita ja signaali pieni.
    - Etuna vähäinen riippuvuus aallonpituudelle.
    - Esim. pyrosähköinen detektor ja bolometri.
  - Kvanttianturit
    - Nopeita, voivat toimia gigahertsien taajuuksilla.
    - Aallonpituusriippuvia ( $E = hf = hc/\lambda$ )
    - Esim. valodiodi (=fotodiodi), valovastus (hidas) ja valomonistinputket

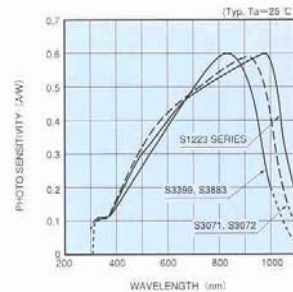
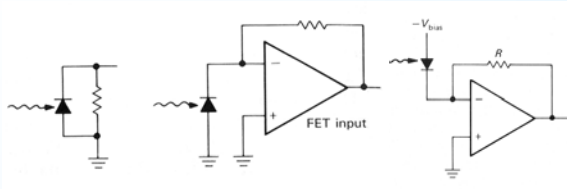
# Valo: valodiodi

- Yleisin valoanturi.
- Fotonit synnyttävät PN-rajapinnalla elektroni-  
aukkopareja, jotka havaitaan sähkövirtana.



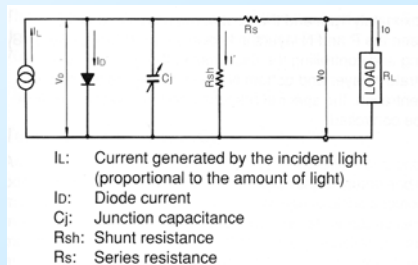
# Valo: valodiodi

- Tyypillisiä kykentöjä



- Rajoituksia:

- Herkkyys  $\sim 0.5$  A/W
  - Aallonpituusriippuva
- Vuotovirta (shunttivastus)
- Kapasitanssi
- Kohina

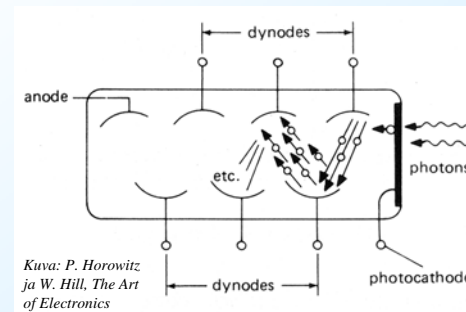


$I_L$ : Current generated by the incident light (proportional to the amount of light)  
 $I_D$ : Diode current  
 $C_j$ : Junction capacitance  
 $R_{sh}$ : Shunt resistance  
 $R_s$ : Series resistance

Kytentätkuvat: P. Horowitz ja W. Hill, The Art of Electronics. Vastekäyrä ja sijaiskytkentä: Hamamatsu

# Valo: valomonistin

- Fotoni irroittaa tyhjötutken katodilta elektronin.
- Kiihdytysjännitteen ohjaama elektroni osuu dynodeille ja monistuu.
- Anodille saadaan moninkertaisen vahvistuksen ansiosta virtapulssi, joka on helposti mitattavissa.



Kuva: P. Horowitz ja W. Hill, The Art of Electronics

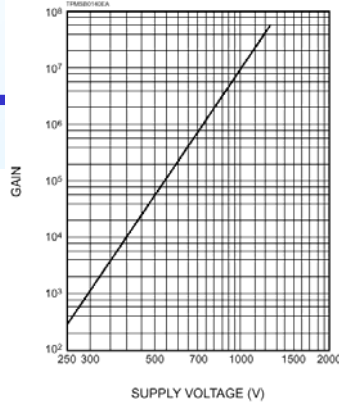
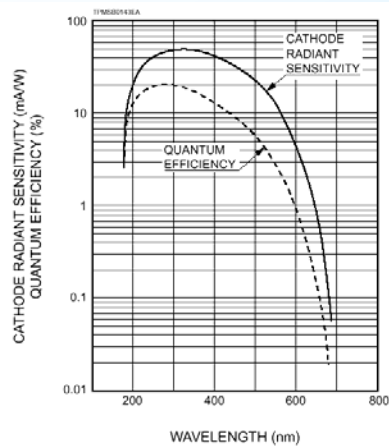
- Hyvin pienille valotehoille
  - Pulssien laskenta (=fotonilaskenta) tai
  - Virran mittaus
- Kvanttihyötysuhde  $\sim 20\%$
- Vaurioituu, jos altistetaan jännitteisenä normaalille valaistukselle

# Valo: valomonistin

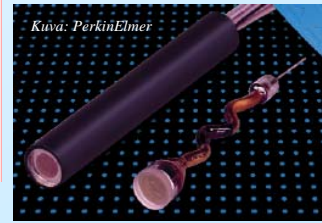
## Perinteinen valomonistinputki



Kuvat: Hamamatsu



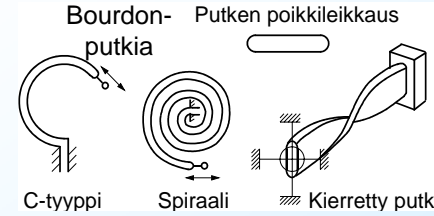
## Channel photomultiplier



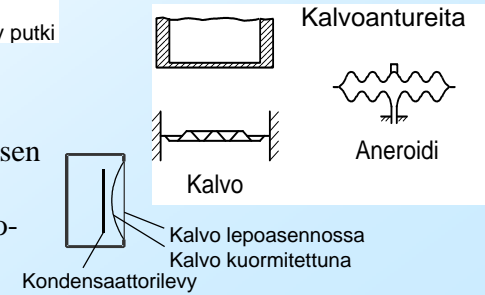
Kuva: PerkinElmer

# Paine: Bourdon-putki ja kalvoanturit

- Perinteisesti: Bourdon-putki ja kalvoanturi

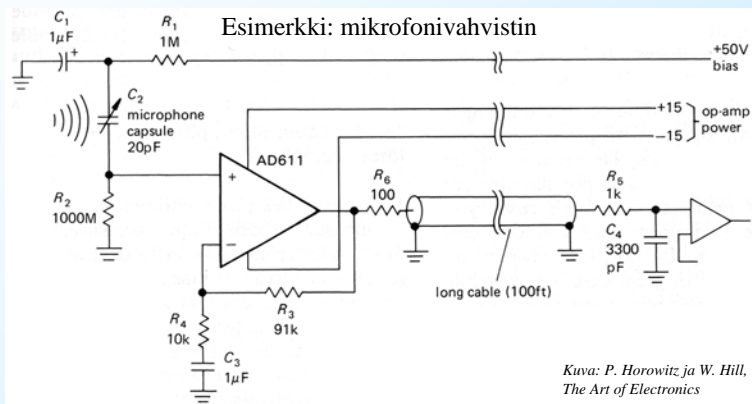


- Kalvoanturi
  - Paine arvo voidaan lukea sähköisesti kalvojen välisen kapasitanssin kautta
  - Voidaan valmistaa mikro-mekaanisesti



# Paine: kalvoanturit ja mikrofonit

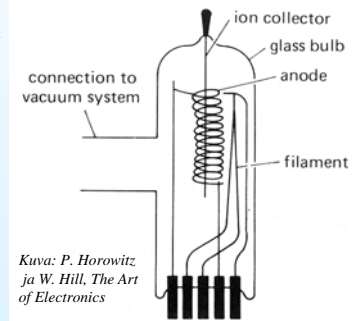
- Kapasitiivisesti: paineanturit, mikrofonit, paikkaanturit...
  - Esim. kapasit. mikrofonin impedanssi ~ 400 MΩ @ 20 Hz



Kuva: P. Horowitz ja W. Hill, The Art of Electronics

# Paine: tyhjiöanturit

- Bayard/Alpert-ionisaatioanturi
  - Painealue: 0.1 Pa - 1×10<sup>-9</sup> Pa (1×10<sup>-6</sup> bar - 1×10<sup>-14</sup> bar)
  - Paine verrannollinen elektronipommituksen tuottamaan ionivirtaan (ion collector)
- Lämpöhäviöanturit
  - Lämmitin-termopari yhdistelmä
  - Perustuu kaasun aiheuttamaan jäähtymiseen
  - Painealue: ~ normaalipaine - 0.1 Pa

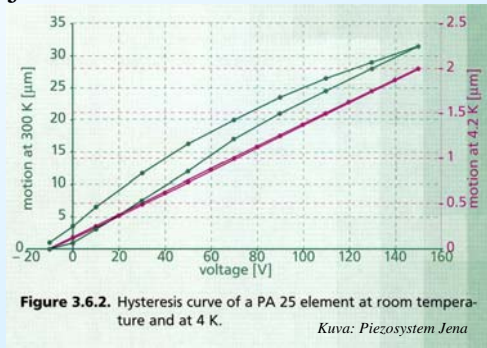
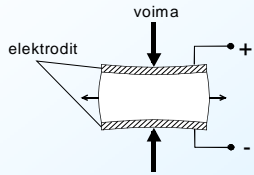


Kuva: P. Horowitz ja W. Hill, The Art of Electronics



## Voima ja liike: pietsoanturi

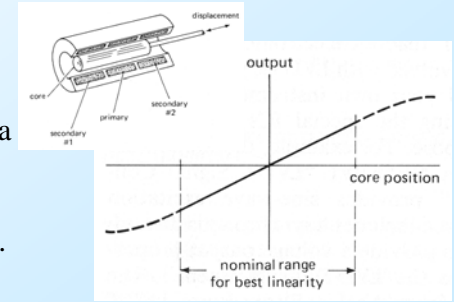
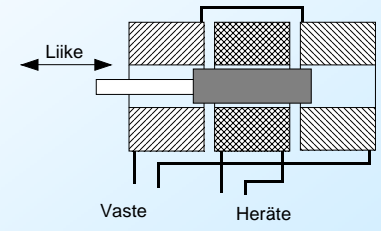
- Pietsosähköisissä kiteissä mekaaninen puristus synnyttää napojen välille jännitteen:



- Käänteinen ilmiö: jännite synnyttää voiman / muodonmuutoksen.
- Materiaalit: PZT = lead-zirconate-titanate  
PMN = lead-magnesium-niobate
- Käytetään esim: kiihtyvyyssanturit, värinäanturit

## Paikka ja liike: Induktiivinen differentiaalimuuntaja

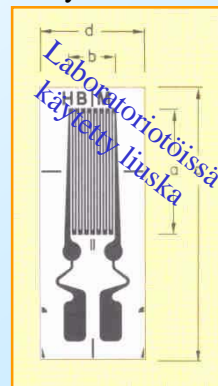
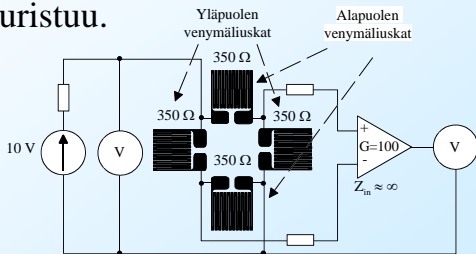
- Muodostuu kolmesta kelasta sekä sydänkappaleesta.
  - Nolla-asemassa herätejännite (vaihtovirta) ei synnytä (vastakkaisuuntaisten) toisokäämien sarjaankytkentään jännitettä.
  - Epäsymmetrinen sydämen asema synnyttää sarjaankytkentään jännitteen, jonka vaihe riippuu liikkeen suunnasta ja amplitudi poikkeutuksen suuruudesta.



## Muodonmuutos: venymäliuska

- Perustuu:
  - Metallin resistanssin muutokseen muodon muuttuessa.
  - Puolijohteen resistiivisyyden muutokseen jännityksen muuttuessa.

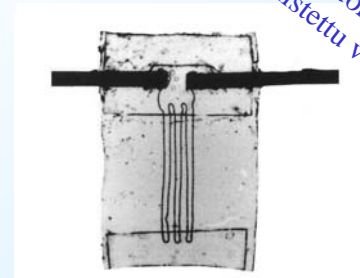
- Liuska liimataan kappaleeseen, jonka muodon muuttuessa liuska venyy tai puristuu.



- Lämpötilan vaikutus kompensoidaan siltakytkemällä

## Muodonmuutos: venymäliuska

- Käytetään:
  - Venymien ja puristumien mittauksiin.
  - Voiman mittaukseen.
  - Paineen mittaukseen.



Vuonna 1954 valmistettu venymäliuska





## Virtaus: paine-eroanturi

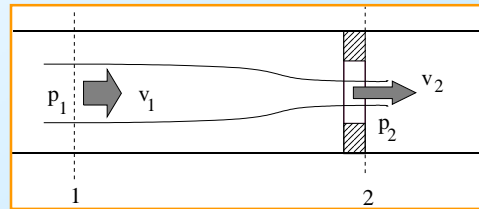
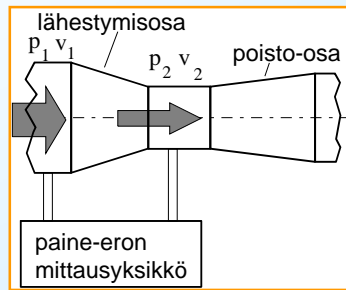
- Venturiputki

Bernoullin laki

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

$p$ =paine,  $\rho$ =tiheys  
ja  $v$ =nopeus

- Mittauslaippa



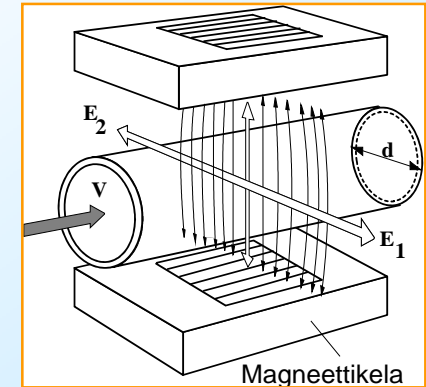
## Virtaus: magneettinen anturi

- Perustuu Hall-ilmioon:

$$E = kvBd$$

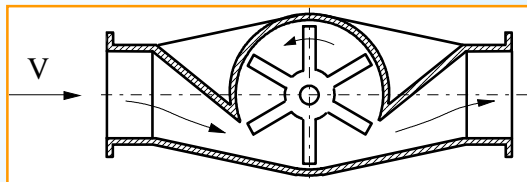
$E$ =jännite,  $v$ =nopeus,  
 $B$ =mg-kenttä,  $d$ =elektrodienväli  
ja  $k$ =korjauskerroin

- Mitattavan nesteen johtavuuden täytyy olla riittävä.
- Putken täytyy olla valmistettu johtamattomasta aineesta.



## Virtaus: turbiinanturi

- Turbiinanturit soveltuvat vain kaasujen tai puhtaiden nesteiden virtauksen mittaukseen.

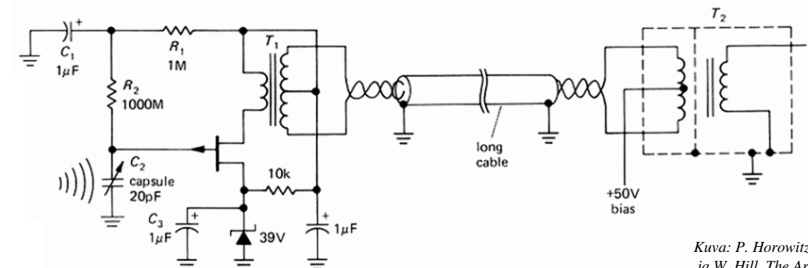


- Muita virtausmittareita:

- Äänen kuluaikamittaukset
- Doppler-mittaukset (optinen tai akustinen)
- Anemometrit (terminen menetelmä)
- Esteen synnyttämän pyörteen taajuusmittaus
- Korrelaattorimittaus

## Anturit

- Pelkän anturitekniikan hallitseminen ei riitä hyvien mittausten saavuttamiseen.
- Lisäksi tulee ymmärtää:
  - Mittaustilanne ja siihen vaikuttavat tekijät.
  - Anturin lähielektroniikka.



Kuva: P. Horowitz  
ja W. Hill, *The Art  
of Electronics*

W. BERGMAN  
CALIFORNIA  
BRANDS  
©1999

# THE END

OH, YOU MEANT  
METRIC...!

