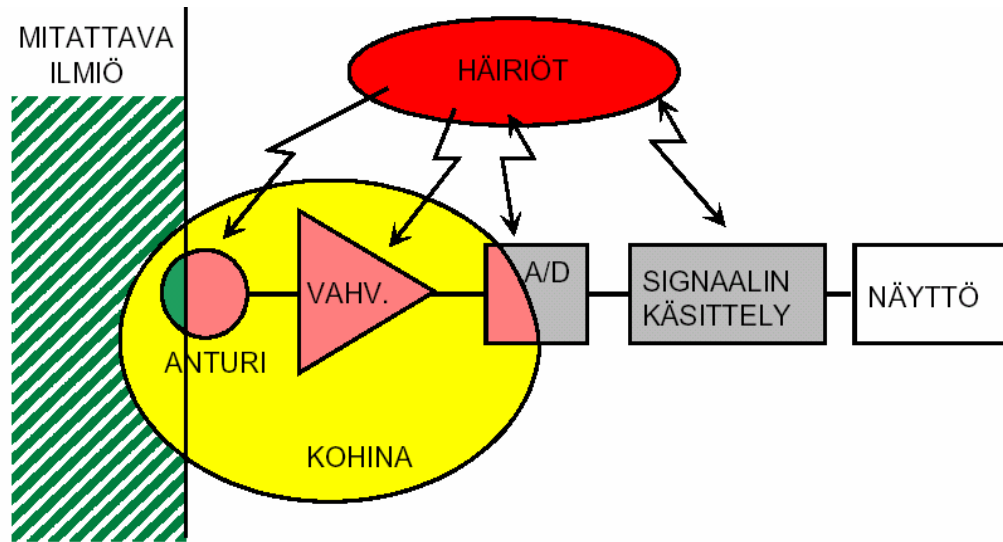


Elektroniset mittaukset

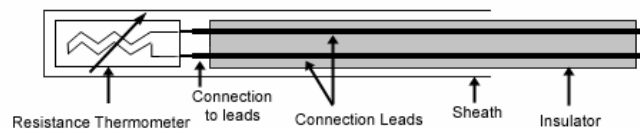


Anturit ja mittausvahvistimet

- Anturityypit ja kytkeminen mittauspiireihin
 - Resisttiiviset anturit
 - Piezosähköiset anturit
 - Kapasitiiviset anturit
 - (Induktiiviset anturit)
 - Jänniteantioiset anturit
 - Virta-antioiset anturit
- Pienten jännitteiden ja virtojen mittaaminen

Resistiiviset anturit

- Resistiivisiä antureita
 - NTC- ja PTC-termistorit
 - Vastusanturit, esim. PT10, PT25, PT100 ja PT1000
 - Venymäliuskat
 - Potentiometrit
- Vaatii pienen ulkoisen herätteen (virta tai jännite)
- Jännitemittaus komponentin yli, siltakytkennässä, jakajassa, tai vakiovirralla



(Platina)Vastusanturit

- Perustuvat metallin resistanssin melko lineaariseen lämpötilariippuvuuteen:

$$R_T = R_0 [1 + \alpha T]$$

- α = lämpötilakerroin, 0,385 %/°C (0,392 %/°C, USA) R_0 = vastusreferenssilämpötilassa 0 °C

- Lisää tarkkuutta voi tarvittaessa hakea sovittamalla kalibrointituloksiin Callendar-Van Dusenin yhtälön:

- $R_T = R_0 [1 + A T + B T^2 + (T - 100) C T^3]$, $T = -200 - 0$ °C

- $R_T = R_0 (1 + A T + B T^2)$, $T = 0 - 661$ °C

- $A = 3,9083 \times 10^{-3}$ °C⁻¹
- $B = -5,775 \times 10^{-7}$ °C⁻²
- $C = -4,183 \times 10^{-12}$ °C⁻³

Platinavastusanturit

- Tarkkoja verrattuna muihin lämpötila-antureihin
- Stabiileja (hyvin pieni ryömintä)
- Laaja käyttölämpötila-alue
- Soveltuu tarkkuusmittauksiin



PT25 tarkkuusmittapää kalibrointilaboratorioille ~5000 €

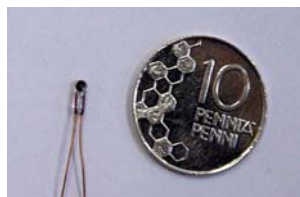
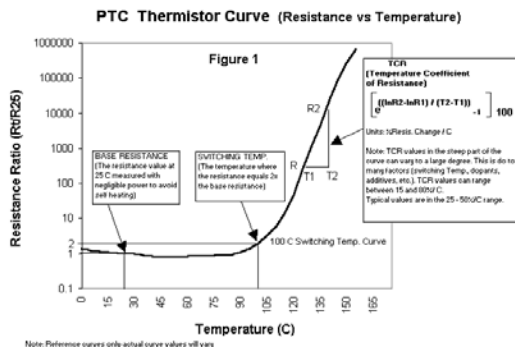


PT100 anturi 5 €



PT100 mittapää 120 €

Termistorit



- Termistorin vastus muuttuu lämpötilan funktiona
- Optimoidaan tietyille lämpötila-alueille
- PTC-termistorin vastus kasvaa lämpötilan kasvaessa
- NTC-termistorin vastus pienenee lämpötilan kasvaessa
- Mikäli mittausvirta on pieni, termistori mittaa ympäristön lämpötilaa. Liian suuri mittausvirta lämmittää sensoria

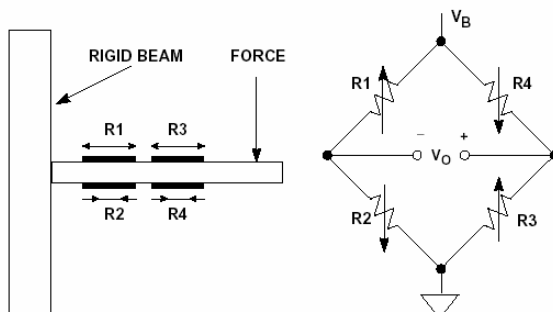
Termistorit

- Halpa (~70 c – 5 €)
- Nopea (pieni massa)
- Epätarkka (toleranssit)
- Epästabiili
- Rajoitettu lämpötila-alue (-40 – 200 °C)
- Herkkä rikkoutumaan
- Ei sovellu tarkkuusmittauksiin

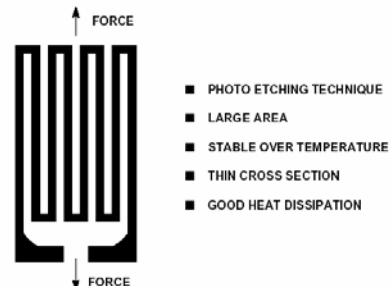


Venymäliuska-anturit

STRAIN GAGE BEAM FORCE SENSOR

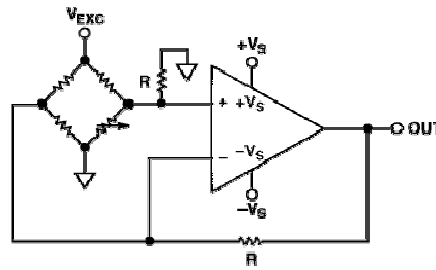
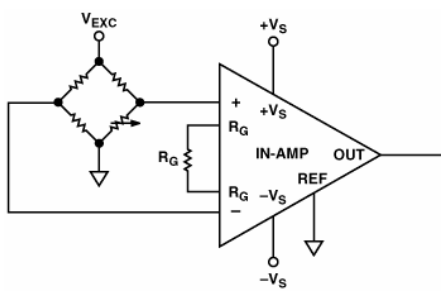


METAL FOIL STRAIN GAGE



- Venymäliuska-anturin resistanssi muuttuu venytyksessä
- Anturien sijoitus kuvan esittämällä tavalla linearisoi piirin ja vähentää lämpötilariippuvuutta

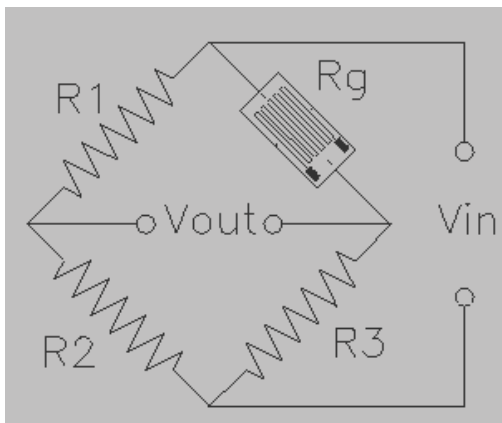
Siltakytkentöjä resistiivisille antureille



- Vastusten muuttuminen saa sillan epätasapainoon, mikä näkyy jännitteenä
- Differentiaalinen jännite vahvistetaan instrumentointivahvistimella
- Takaisinkytkentä pitää sillan jatkuvasti tasapainossa syöttämällä virtaa sillan vasemmalle puolelle
- Virta muuntuu ulostulojännitteeksi oparikytkennässä (virta-jännitemuunnin)

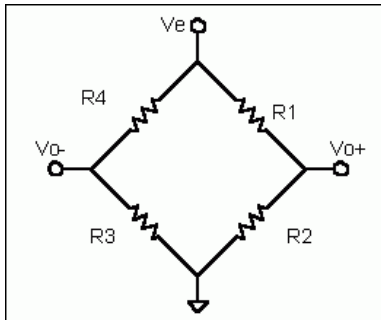
Lähde: Analog Bridge Wizard

Wheatstonen silta



- Sillan epäsymmetria aiheuttaa jännitteen sillan yli
- Mitattava resistiivinen anturi kytketään yhteen sillan haaroista
- Jännite voidaan nollata säätämällä sillan resistansseja tai sähköisellä takaisinkytkennällä
- Automaattisissa mittauksissa luetaan sillan yli oleva jännite ja lasketaan tästä sensorin arvo

Wheatstonen sillan yhtälöt



Jännitteenjaosta saadaan

$$V_o = V_{O+} - V_{O-} = V_e \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right)$$

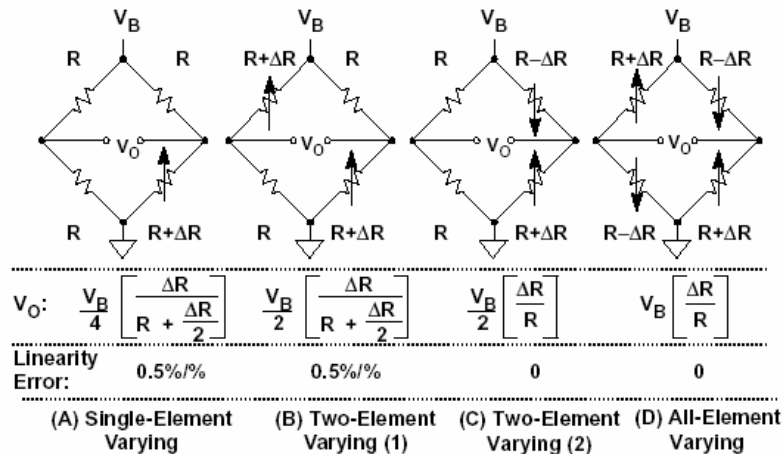
Tasasuuruksilla vastuksilla

$$V_o \approx V_e \left(\frac{\Delta R_1 - \Delta R_2 + \Delta R_3 - \Delta R_4}{4R} \right)$$

- Lineaarinen ulostulo, mikäli vastus ei muutu paljon (<5%)
- Lineaarisuutta ja lämpötilariippuvuutta voidaan parantaa käyttämällä useampia (+/-) antureita

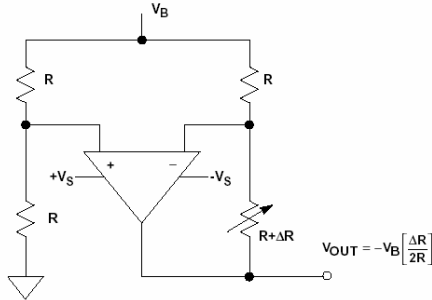
Siltäkytkentöjen herkkyyys ja lineaarisuus

OUTPUT VOLTAGE AND LINEARITY ERROR FOR CONSTANT VOLTAGE DRIVE BRIDGE CONFIGURATIONS

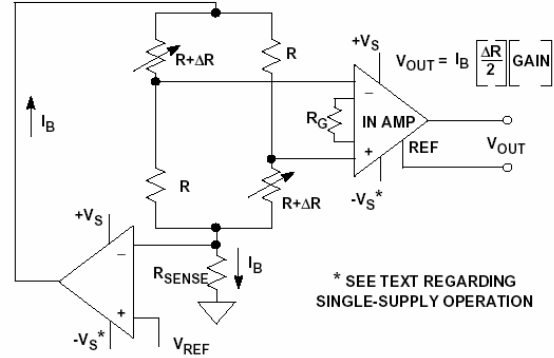


Linearisointi operaatiovahvistimilla

LINEARIZING A SINGLE-ELEMENT VARYING BRIDGE
METHOD 1

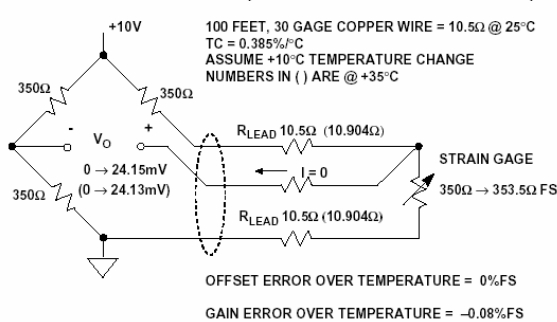


LINEARIZING A TWO-ELEMENT VARYING BRIDGE
METHOD 2 (CONSTANT CURRENT DRIVE)

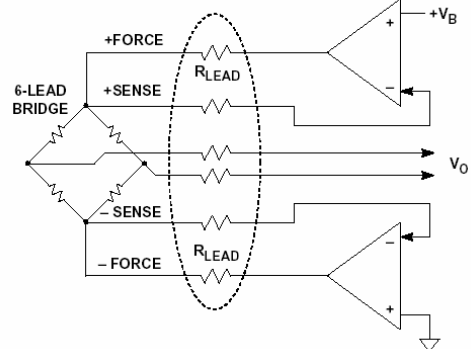


Johdinresistanssien minimointi siltamittauksissa

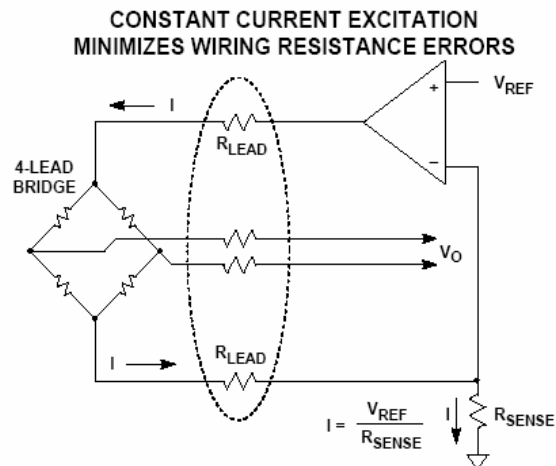
3-WIRE CONNECTION TO REMOTE
BRIDGE ELEMENT (SINGLE-ELEMENT VARYING)



KELVIN (4-WIRE) SENSING MINIMIZES ERRORS
DUE TO LEAD RESISTANCE

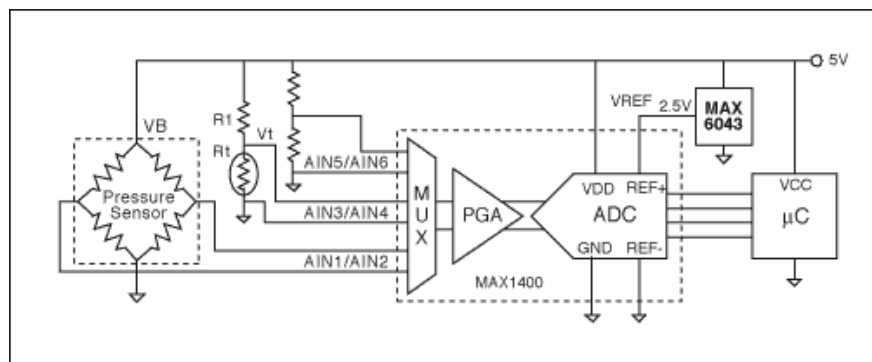


Johdinresistanssien minimointi neljällä karvalla



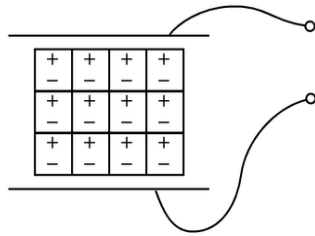
- Virtasyöttö on tunteeton johdinresistanssien muutoksille!

Muita kytkentöjä resistiivisille antureille

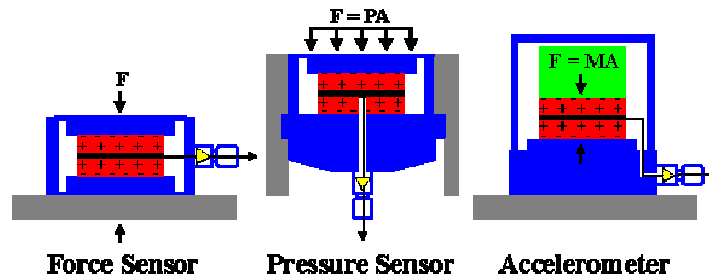


- Mikäli tulos viedään prosessorille, ei lineaarisuus ole ongelma (voidaan korjata softalla) -> puolisiltakin voi riittää (kuva)
- Vakiovirran syöttäminen anturiin antaa lineaarisen jänniteulostulon

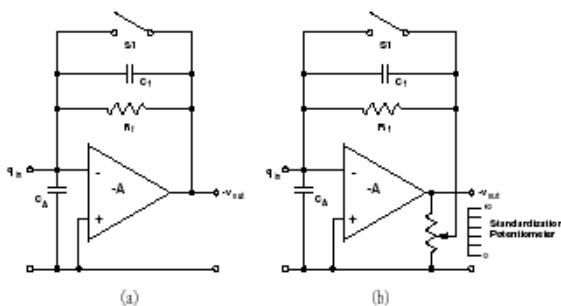
Pietsosähköiset anturit



- Pietsosähköisen keraamisen aineen (esim. kvartsi) puristaminen polarisoi aineen, mikä näkyy varauksena
- Mittaus varausvahvistimella
- Käyttökohteet: voima, paine, kiihtyvyys



Varausvahvistin



$$U_{out} = -Q_m / C_f$$

- Suuri-impedanssinen, suurivahvistuksinen, kapasitiivisella takaisinkykennällä varustettu erikoisvahvistin

- Ulostulo verrannollinen sisäänmenossa olevan varauksen suuruuteen

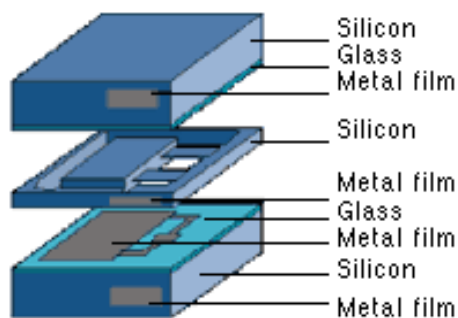
Kapasitiiviset anturit

- Kahden levyn välinen kapasitanssi:

$$C = K\epsilon_0 \frac{A}{d}$$

- Kapasitanssi muuttuu kun:
 - Väliaineen dielektrisyysvakio K muuttuu (esim. pinnan korkeusmittari, jossa nestepatsas nousee levyjen välissä)
 - Levyjen yhteinen pinta-ala A muuttuu (esim. paikkasensori)
 - Levyjen välinen etäisyys d muuttuu (esim. paikkasensori, kiihtyvyyssanturi)
- Kapasitanssin muutos voidaan lukea esim. siltakytkennällä tai varausvahvistimella. Voidaan myös kytkeä oskillaattoriksi, jonka taajuus mitataan.

Kiihtyvyyssanturi

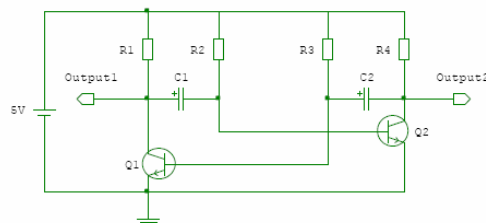
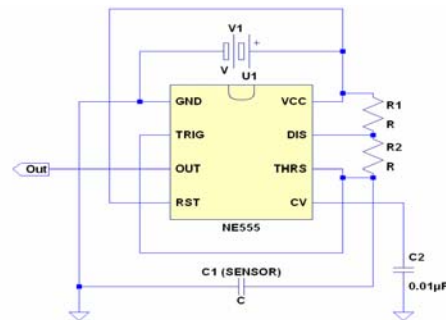
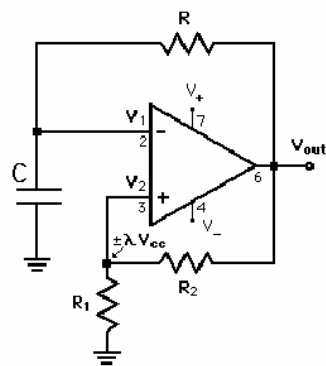


- Piipalkki taipuu kiihtyvyyden vaikutuksesta
- Palkin molemmin puolin on kapasitanssit, joista toinen kasvaa ja toinen pienenee
- Voidaan lukea esim. siltakytkennällä (kaksi muuttuvaa kapasitanssia parantaa lineaarisuutta) tai varausvahvistimella
- Mittausalue 0.5 g - 500 g
- Suurkäyttämä autoteollisuus

Kapasitiivisten anturien mittauselektronikka

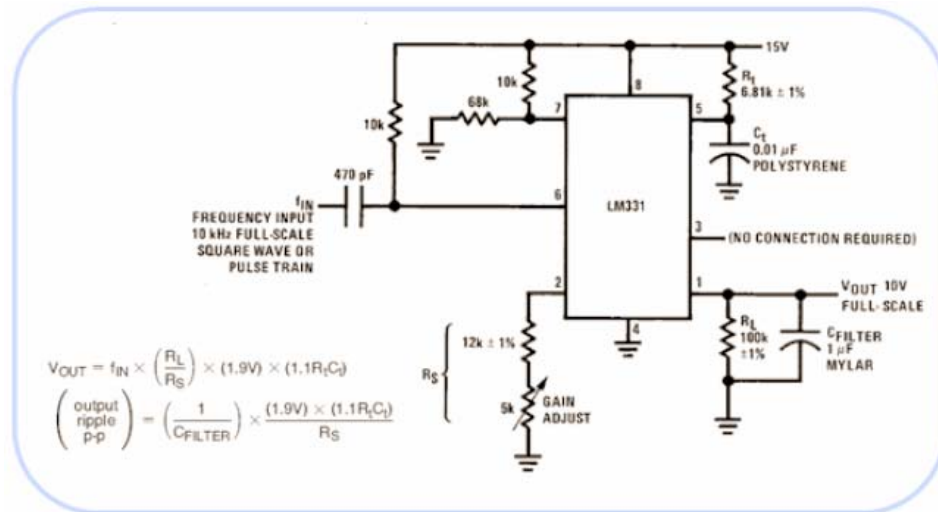
- Kapasitanssi voidaan kytkeä siten että se muuttaa esim.
 - Taajuutta
 - Pulssisuhdetta (pulssin pituutta)
 - Jännitteen jakoa (silta tai puolisolta)
- Esimerkkejä (vuoden 2006 kotitenti) :
 - Kapasitanssin mukaan säätävä oskillaattori ja taajuus-jännitemuunnin
 - Kapasitanssi/jännite-muunnin
 - Kapasitanssi/taajuus-muunnin
 - Kapasitanssi/digitaali-muunnin
 - SC-tekniikat (C :n impedanssi riippuu taajuudesta)
 - Varausvahvistin

Oskillaattoreita



Taajuus/jännite-muuntimia

LM331, AD650, LM2907



AD7746 24-bit, 2 Channel Capacitance to Digital Converter

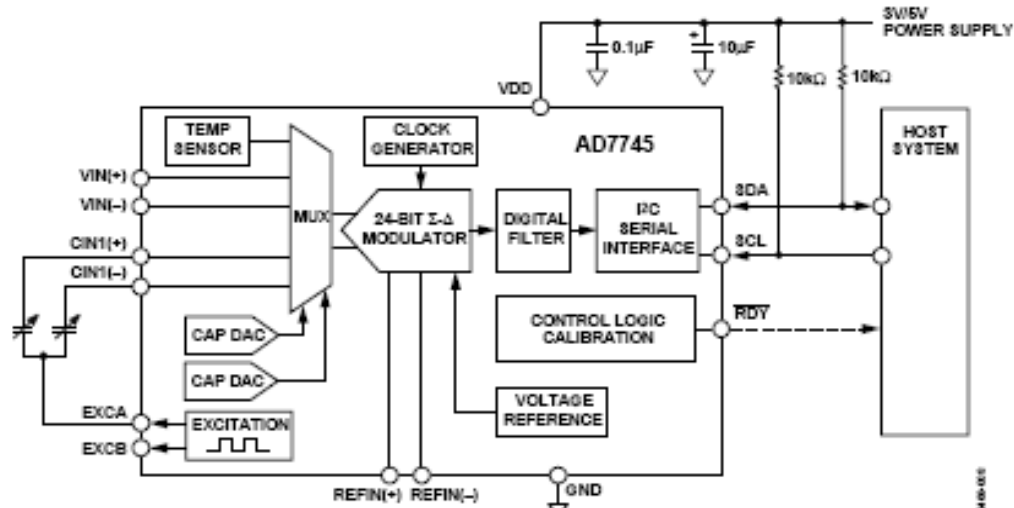
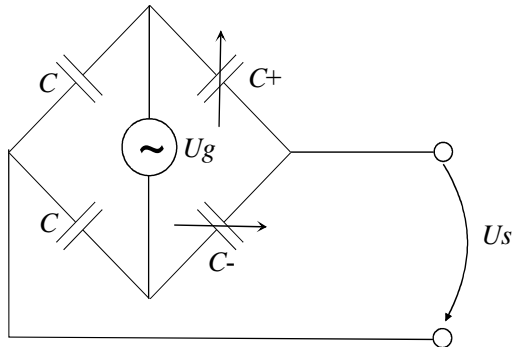


Figure 43. Basic Application Diagram for a Differential Capacitive Sensor

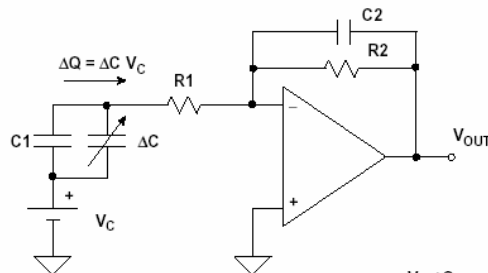
AC-sillat



- Samat periaatteet kuin DC-silloissa, mutta käytetään vaihtojännitteellä
- Impedansseina käytetään kapasitansseja, induktansseja, resistansseja ja näiden yhdistelmiä

Kapasitiivisen anturin mittaus varausvahvistimella

CHARGE AMPLIFIER FOR CAPACITIVE SENSOR



- FOR CAPACITIVE SENSORS: $\Delta V_{OUT} = \frac{-V_C \Delta C}{C_2}$
- FOR CHARGE-EMITTING SENSORS: $\Delta V_{OUT} = \frac{-\Delta Q}{C_2}$
- UPPER CUTOFF FREQUENCY = $f_2 = \frac{1}{2\pi R_2 C_2}$
- LOWER CUTOFF FREQUENCY = $f_1 = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$

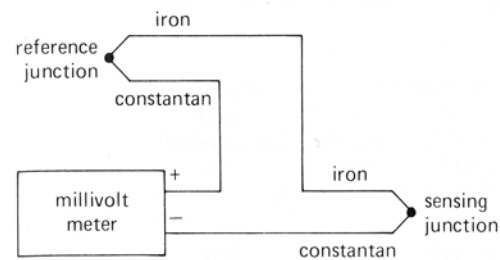
- Mikäli kapasitiivisen anturin yli oleva jännite pidetään vakiona, näkyy kapasitanssin muutos varauksen muutoksena

Jänniteantoiset anturit

- Useat detektorit ovat jännite-antaisia
 - Paineanturit
 - Termoparit
- Tavallaan helpoin anturityyppi:
 - Signaali jo valmiiksi jännitemuodossa
 - Vahvistus esim. Oparikytkenöillä tai differentiaalivahvistimilla
 - Voi kytkeä myös suoraan A/D muuntimelle, mikrokontrollerille tai PC:n mittauskortille (mikäli taso riittää)
- Resistiivisten, kapasitiivisten, ja virta-antosten antureiden mittausta vaatii usein pienten jännitteiden mittausta

Jänniteantoinen anturi: termopari

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

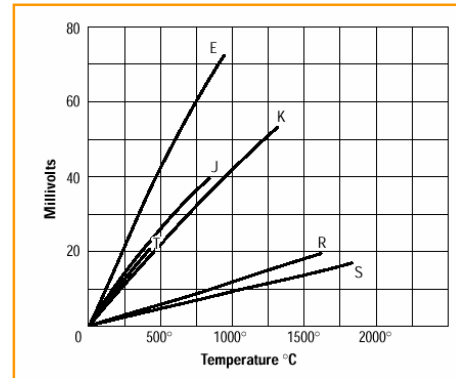


constantan: 55% Cu 45% Ni

Termopareja

Type	Alloy	Max temp ^a (°C)	Tempco @20°C (µV/°C)	Output voltage ^b			30 gauge lead resistance ^c (Ω)
				100°C (mV)	400°C (mV)	1000°C (mV)	
J	{Iron {Constantan ^d	760	51.45	5.268	21.846	–	3.6
K	{Chromel ^e {Alumel ^f	1370	40.28	4.095	16.395	41.269	6.0
T	{Copper {Constantan ^d	400	40.28	4.277	20.869	–	3.0
E	{Chromel ^e {Constantan ^d	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

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



Termojännite V riippuu liitosten lämpötilaerosta $T_{J1} - T_{ref}$ ja Seebeck-

$$V = \alpha(T_{J1} - T_{ref})$$

Termoparien ominaisuuksia

- Ei aivan niin tarkka, lineaarinen, stabiili kuin PT100, mutta melko hyvä
- (Halvempi kuin PT100)
- Pienikokoisempi ja nopeampi kuin PT100
- Yltää korkeampiin lämpötiloihin kuin PT100 (jopa 1800 °C)



T-tyypin termopari ruuvikierteellä 40 €



K-tyypin termopari 12 €



K-tyypin mittapää 60 €

Termoparien mittauskytkenjöjä

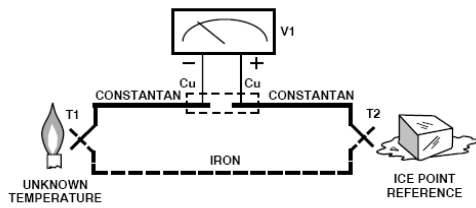


Figure 14. Thermocouple Voltage with 0°C Reference

Rutiinimittauksissa (esim prosesseissa) hyväksytään suurempi mittauserävarmuus. Referenssin lämpötila seuraa ympäristön lämpötilaa. Virhe kompensoidaan elektroniikalla.

Tarkoissa mittauksissa referenssiliitos pidetään tunnetussa lämpötilassa, esim. jäävedessä

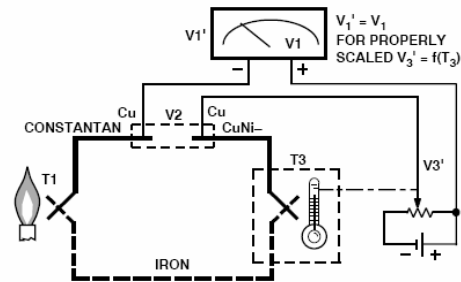


Figure 15. Substitution of Measured Reference Temperature for Ice Point Reference

AD594/AD595 termoparivahvistin

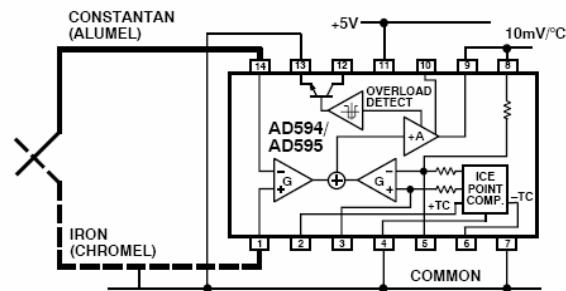


Figure 1. Basic Connection, Single Supply Operation

- Termopari tulee piirille kahdella karvalla
- Referenssiliitos muodostuu piirikortilla (kupari-konstantaani ja kupari-chromel)
- Piirin kotelo ja piirikortin kuparit pidetään samassa lämpötilassa (lämpökontakti esim. piitahnalla)
- Kotelon sisällä oleva kompensointipiiri korjaa ympäristön lämpötilan vaikutuksen

LM35 Precision Centigrade Temperature Sensor

Features

- Calibrated directly in ° Celsius (Centigrade)
- Linear + 10.0 mV/°C scale factor
- 0.5°C accuracy guaranteeable (at +25°C)
- Rated for full -55° to +150°C range
- Suitable for remote applications
- Low cost due to wafer-level trimming
- Operates from 4 to 30 volts
- Less than 60 μ A current drain
- Low self-heating, 0.08°C in still air
- Nonlinearity only $\pm 1/4$ °C typical
- Low impedance output, 0.1 Ω for 1 mA load

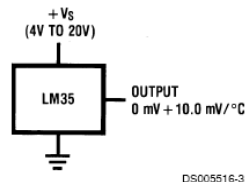
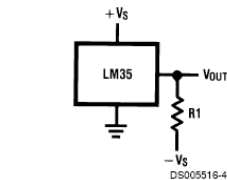


FIGURE 1. Basic Centigrade Temperature Sensor (+2°C to +150°C)



Choose $R_1 = -V_S/50 \mu A$
 $V_{OUT} = +1,500 \text{ mV at } +150^\circ\text{C}$
 $= +250 \text{ mV at } +25^\circ\text{C}$
 $= -550 \text{ mV at } -55^\circ\text{C}$

FIGURE 2. Full-Range Centigrade Temperature Sensor

Pienten jännitteiden mittaus

- Pienten jännitteiden (<1 μ V) mittausten ongelmia:
 - Terminen kohina
 - Termosähköiset jännitteet
 - Magneettikentät
 - Maasilmukat

Terminen kohina

- Johnson noise

$$E_{rms} = \sqrt{4kTBR}$$

- Viimeisin rajoittava tekijä sähköisissä mittauksissa
- Voidaan minimoida
 - Alentamalla lämpötilaa
 - Kaventamalla kohinakaistanleveyttä (hidastaa piiriä ja lisää mittausaikaa!) esim. keskiarvoistamalla
 - Yleensä resistanssien pienentäminen ei toimi
 - Signaali pienenee tyypillisesti samassa suhteessa kuin kohina
 - Virtamittauksissa jopa enemmän koska mitattava signaali pienenee suhteessa resistanssiin, mutta kohina suhteessa sen neliöjuureen
 - Kytkenät kuluttavat pienillä resistansseilla enemmän virtaa ja lämpenevät

Termosähköiset jännitteet

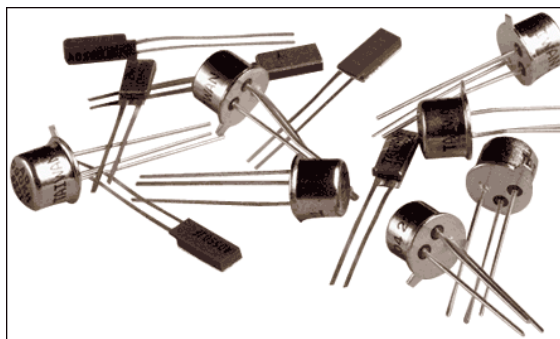
- Syntyy kun piirikortin eri alueet ovat eri lämpötiloissa, tai kun eri materiaaleja yhdistetään galvaanisesti toisiinsa
- Tina/kupari-liitos $3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
- Useinmiten kumoutuvat, kun sähkö kulkee täyden ympyrän
- Lämpötilagradienttien minimointi:
 - Piirikortin liitokset samaan lämpötilaan (Eristeet valittava hyvin lämpöä johtaviksi: eloksoitu alumiini, beryllium-oksidi, safiiri, timantti)
 - Laitteiden annettava lämmitä
 - Ympäristön stabiilius
 - Laitteiden herkimmille osille stabiloitu uuni
- Krimppausliitokset (puristettu kupari-kupari)

Magneettikentät

- Magneettikentissä heiluvat johdot generoivat virtaa
- Maan magneettikenttä saattaa aiheuttaa nanovolttien signaaleja
 - Lyhyet johtimet, heiluminen estetään kiinnityksellä
 - Vältetään suuria pinta-aloja johtimen ja paluujohtimen välissä
 - Johdot lähekkäin
 - Kierretyt johtimet
 - Herkkien paikkojen suojaus myy-metallilla
- Vältä maasilmukoita maadoittamalla kaikki laitteet samaan pisteeseen
- Digitaalisilla nanovolttimittareilla pystyy mittaamaan noin 15 nV resoluutiolla

Pienten virtojen mittaus

- Useat detektorityypit ovat virta-antaisia
 - Fotodiodit
 - Valomonistinputket
 - Lämpötilasensorit



AD590 2-Terminal IC Temperature Transducer

FEATURES

- Linear current output: 1 $\mu\text{A}/\text{K}$
- Wide temperature range: -55°C to $+150^\circ\text{C}$
- Probe-compatible ceramic sensor package
- 2-terminal device: voltage in/current out
- Laser trimmed to $\pm 0.5^\circ\text{C}$ calibration accuracy (AD590M)
- Excellent linearity: $\pm 0.3^\circ\text{C}$ over full range (AD590M)
- Wide power supply range: 4V to 30V
- Sensor isolation from case
- Low cost

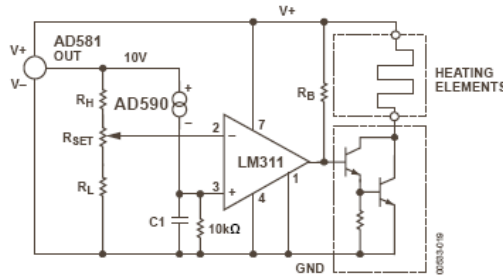


Figure 21. Simple Temperature Control Circuit

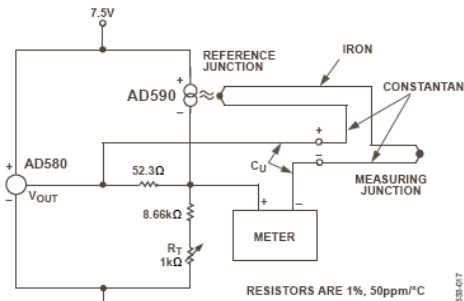
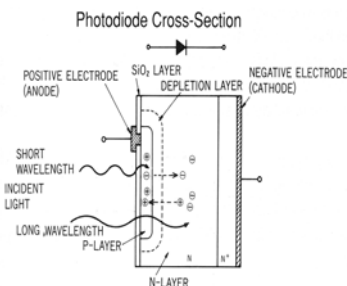
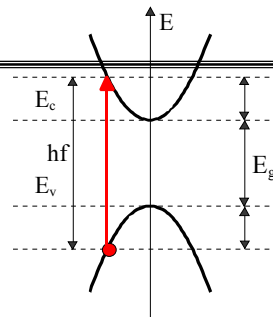


Figure 9. Cold Junction Compensation Circuit for Type J Thermocouple

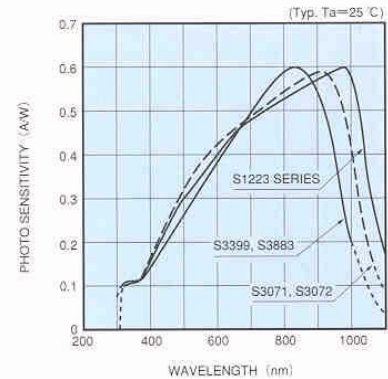
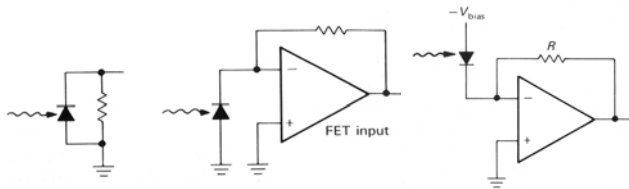
Fotodiodit

- Yleisin valoanturi.
- Fotonit synnyttävät PN-rajapinnalla elektronivirtaa, jotka havaitaan sähkövirtana.
- Aallonpituusalue riippuu band-gap energiasta (Si, Ge, GaP ...)



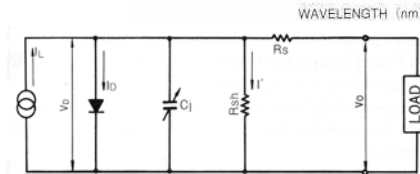
Fotodiodien kytkentä

- Tyypillisiä kytkentöitä



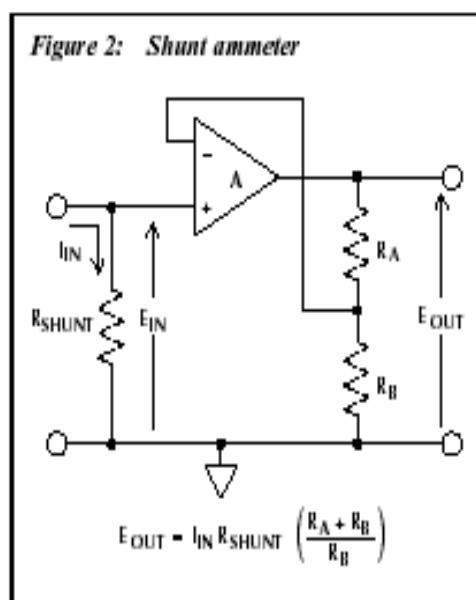
- Rajoituksia:

- Herkkyys ~ 0.5 A/W
 - Aallonpituusriippuva
- Vuotovirta
- Kapasitanssi
- Kohina



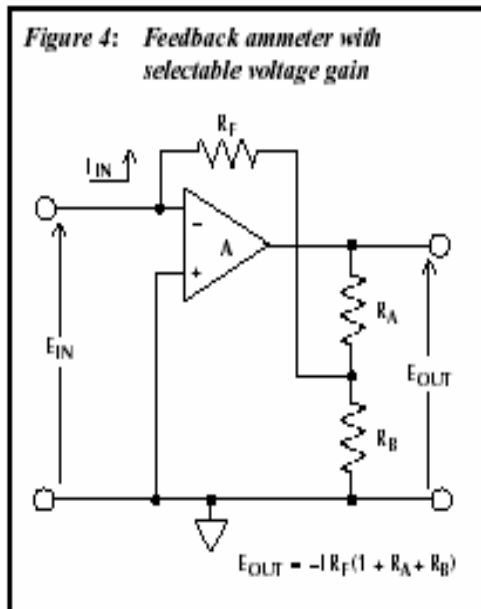
- IL: Current generated by the incident light (proportional to the amount of light)
- ID: Diode current
- Cj: Junction capacitance
- Rsh: Shunt resistance
- Rs: Series resistance

Shunttivastus-virtamittari



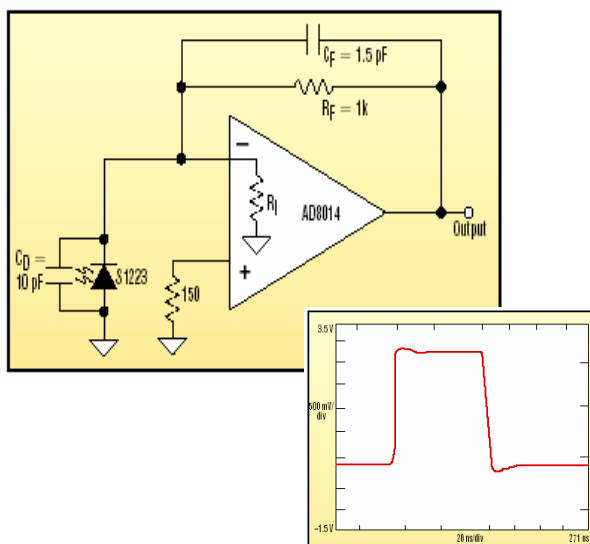
- Tavallisin tapa virran mittaukseen yleismittareissa
- Virran mittaus muutetaan jännitteen ja resistanssin mittaukseksi
- Vastuksen mitoituksessa huomioitavaa:
 - Suuri vastus helpottaa jännitteen mittausta
 - Pienet vastukset ovat tarkempia ja stabiilimpia (lämpötila, aika)
 - Pienellä vastuksella nopeampi vaste ja pienempi Burden-voltage
 - Kohinassa optimoitava jännitemittarin ja vastuksen kohina
- Tyypillisesti 1-2 V jännitealue hyvä kompromissi

Virta-jännite-muunnin



- Paras vaihtoehto fotodiodeille
- Sisäänmenon impedanssi $Z_{in} = R_F / A$ mutta $gain = E_{out} / I_{in} = R_F$
- Matala Burden-voltage -> Kuormittaa anturia vähemmän kuin shunttimittari (Linearisuus)
- Pieni sisäänmenoimpedanssi -> nopea nousuaika

Virta-jännitemuuntimen käytännön toteutus



- Fotodiodien ulostulon hajakapasitanssi on melko korkea (~10 pF)
 - Peruskytkeä on hidas (aikavakio $\sim R_F * C_D$)
 - Alipäästösuodatin takaisinkytkennässä aiheuttaa epästabiiliutta
- Kompensoidaan kapasitiivisellä takaisinkytkennällä C_F

Virta-jännite muuntimia

TDL Electrometer (current-to-voltage converter) Model 206



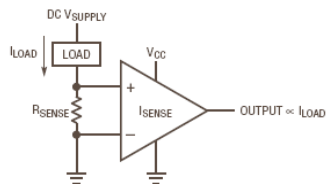
AMETEK Model 181 Current Sensitive Preamplifier



Keithley Model 428-PROG Programmable Current Amplifier



Virranmittausvahvistin



Low Side Advantages

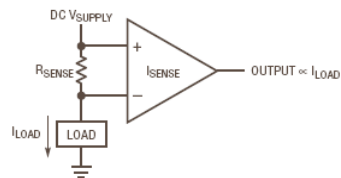
- Low input common mode voltage
- Ground referenced output voltage
- Easy single supply design

Low Side Disadvantages

- Load lifted from direct ground connection
- Load activated by accidental short at ground end load switch
- High load current caused by short is not detected

Amplifier Types for Low Side Implementation

- Precision zero-drift op amps: LTC2050, LTC2054
- Instrumentation amplifiers: LTC2053, LT1990, LTC6943
- Rail-to-Rail Input op amps: LT1677



High Side Advantages

- Load is grounded
- Load not activated by accidental short at power connection
- High load current caused by short is detected

High Side Disadvantages

- High input common mode voltages (often very high)
- Output needs to be level shifted down to system operating voltage levels

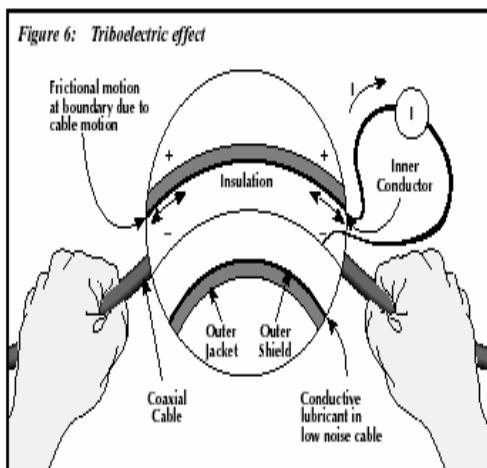
Amplifier Types for High Side Implementation

- Dedicated current sensing amplifiers: LT6100, LTC6101, LT1787
- Over-the-Top™ op amps: LT1637
- Flying capacitor amplifier: LTC6943

Pienten virtojen mittaus

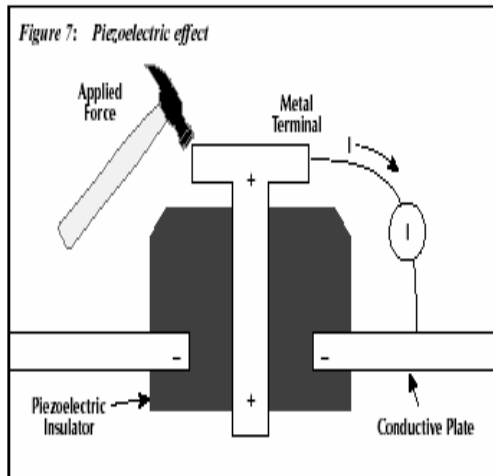
- Pienten virtojen (<100 nA) mittausten ongelmia
 - Kuormituksen aiheuttama epälineaarisuus
 - Tribosähköinen ilmiö
 - Piezosähköinen ilmiö
 - Sähkökemiallinen ilmiö
 - Eristeiden vuotovirrat (Guardin käyttö)

Tribosähköinen ilmiö



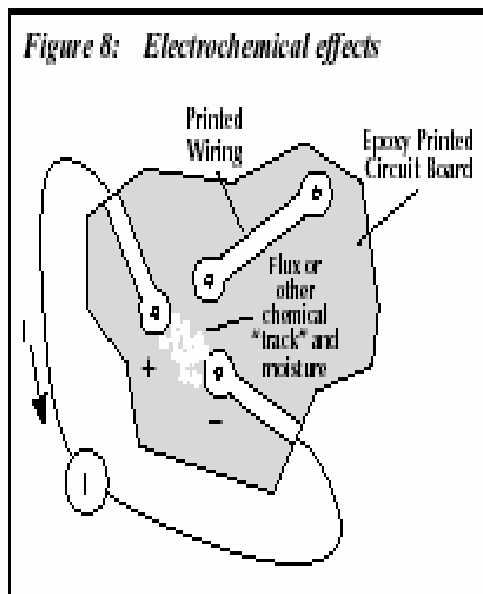
- Kitka generoi eristeen ja johteen rajapintaan varausta kaapelia taivutettaessa, mikä näkyy vuotovirtana.
- Riippuu kaapelityypistä. Pienille virroille on olemassa erityisiä vähäkitkaisia koaksiaali- ja triaksiaalikaapeleita
- Kaapelit pidettävä mittauksissa paikallaan, tai vuotovirrat mitattava kullekin lukemalle erikseen.

Piezosähköinen ilmiö



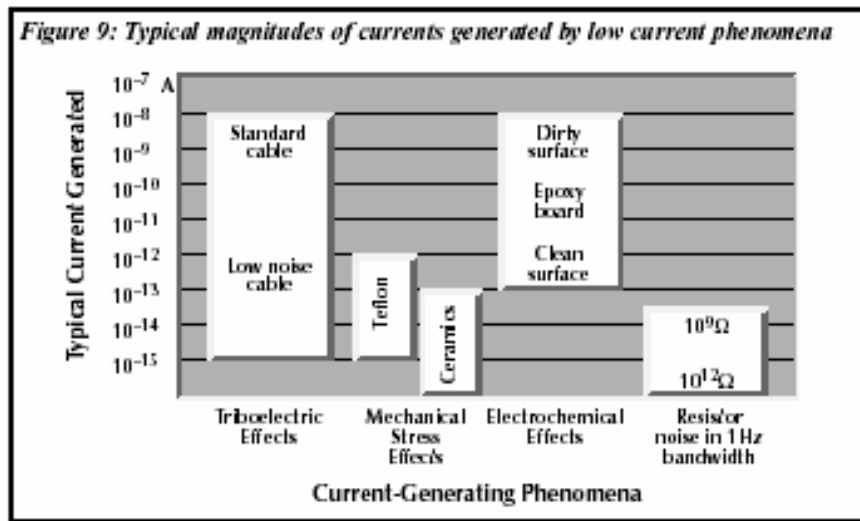
- Tietyissä eristetyypeissä mekaaninen stressi aiheuttaa varauksia ja virtaa (keraamit, muovit)
- Saattaa aiheuttaa ongelmia esim. jos mittauspöydillä on hurisevia laitteita

Sähkökemialliset ilmiöt



- Kemialliset aineet voivat aiheuttaa terminaalien väliin sähköpareja
- Likaiset epoksi-piirilevyt saattavat aiheuttaa useiden nanoamppeerien häiriövirtoja
- Tarkoissa mittauksissa piirilevyt on puhdistettava esim. etanolilla ennen käyttöä

Virheiden suuruusluokat virtamittauksissa



Esimerkkejä Guardin käytöstä

