

# Érzékelők és Működtetők I.

## **A hossz mérés, elmozdulás mérés szenzorai**

1. Potenciométeres átalakítók
2. Nyúlásmérő bélyeges átalakítók
3. Induktív átalakítók
4. Optoelektronikus átalakítók
5. Kapacitív átalakítók

## **A sebesség- és gyorsulás mérés szenzorai**

1. Indukciós átalakítók
2. Örvényáramos átalakítók
3. Piezoelektromos átalakítók
4. Induktív átalakítók

## **Az erő-, nyomaték-, és nyomásmérés szenzorai**

1. Nyúlásmérő bélyeges átalakítók
2. Piezoelektromos átalakítók
3. Kapacitív átalakítók

## **A hőmérséklet-, hőmennyiség-mérés szenzorai**

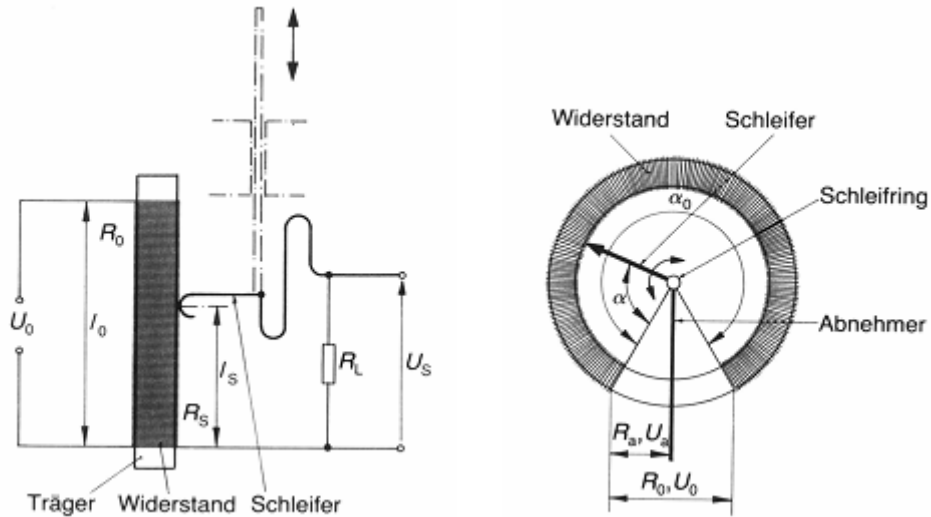
1. Bimetálok
2. Ellenállás-hőmérők, termisztorok
3. Hőmérséklet mérés diódával
4. Termoelemek

## **A fény (elektromágneses sugárzás), mágneses mező mérésének szenzorai**

1. Fotodiódák
2. Fotóellenállások
3. Fotótranszisztorok
4. Fényelemek
5. Magnetorezisztív elemek
6. Hall elemek

# 1. A hossz mérés, elmozdulás mérés szenzorai

## 1.1. Potenciométeres átalakítók



- Alapegyenletek:

$$R = c\alpha (= cs)$$

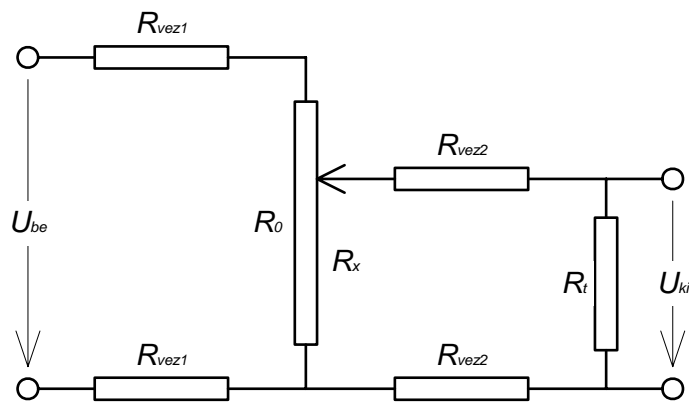
$$c = \frac{R_{\max}}{\alpha_{\max}} \left( = \frac{R_{\max}}{s_{\max}} \right)$$

$$a = \frac{\alpha}{\alpha_{\max}}$$

$$R = aR_{\max}$$

- Terheletlenül lineáris csak!
  - A linearitást rontó, állandó ellenállások
    - Terhelés
    - Vezetékek
    - Más áramköri elemek

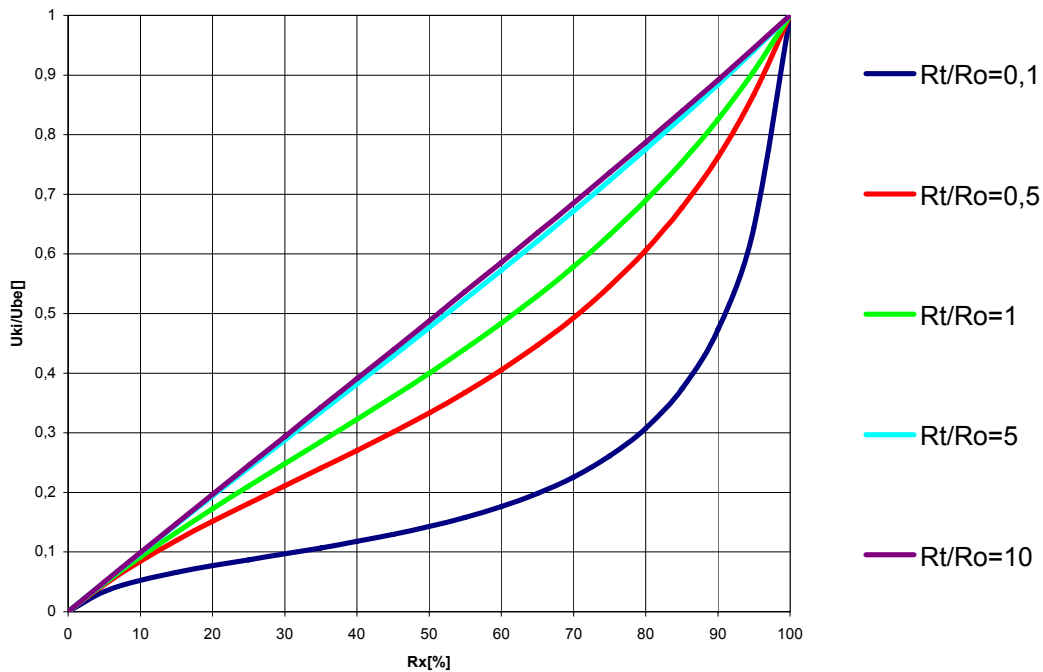
A modellezéshez használható kapcsolás:



- Egyszerű terheléssel (elhanyagolva a vezetékellenállásokat) a karakterisztika:

$$u_{ki} = \frac{R_t \times R_x}{(R_0 - R_x) + R_t \times R_x} u_{be}$$

Az átalakító karakterisztikájának változása a terhelő-ellenállás függvényében



Típusaik:

• Réteg

- Karakterisztika lehet (az ellenállásréteg változó vastagságával érhető el)

- Lineáris,
- Exponenciális,
- Logaritmikus

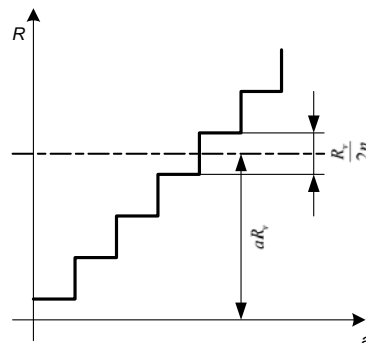
- Speciális csoport a trimmer (beállító) potenciométer. Jellemző rá a rosszabb minőség, ezért érzékelőként nemigen használatos.

• Huzalos

- Nagyobb megbízhatóság
- Kisebb névleges ellenállás-tartomány
- A jelleggörbéjük azonban lépcsőzetes!
- A lépcsőzetesség mértéke:

$$S = \frac{1}{2n}$$

$$R = aR \pm \frac{R_{\max}}{2n}$$



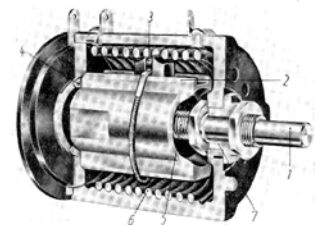
- Műszertechnikában a leggyakoribb a helikális potenciométer. (Cél az  $n$  növelése volt.)

• Híganyos gyűrűs potenciométer

- Gyakorlatilag nincs súrlódás (gyűrűs távadó)

• Hibaforrások:

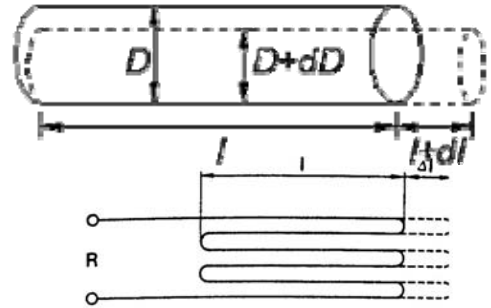
- Súrlódások, kopások.



## 1.2. A nyúlásmérő bélyeg

- Rugalmas deformációt mérő ellenállás
- Anyaga: fémhuzal, vagy félvezető
- Hossz, keresztmetszet (tenzometrikus hatás), és a fajlagos ellenállás (piezorezisztív hatás) megváltozásán alapszik:

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon(1 + 2\nu) + \frac{d\rho}{\rho}$$

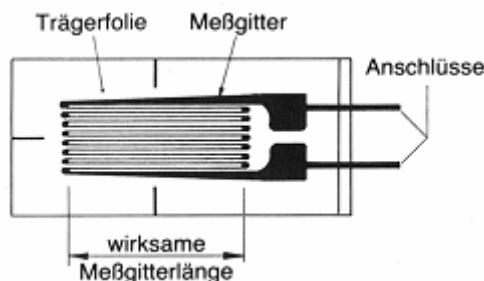


- Feltétel: a huzal deformációja a rugalmassági határán belül legyen
- Rendszerint több szálát alkalmazunk, mert egy szál merevedése kicsi és a mérés jel/zaj viszonya rossz (villamosan soros, deformáció szempontjából pedig párhuzamos kapcsolásúak)

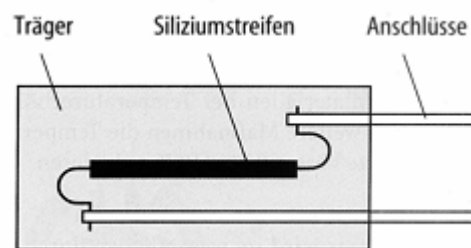
- Nyúlásmérő alapegyenlete:  $\frac{dR}{R} = (1 + 2\nu + \psi)\varepsilon = k\varepsilon$ , ahol  $k$ : gauge faktor

- Huzalos bélyegek:
  - Névleges ellenállásuk 120, (300), 350, 600, vagy 1000Ω
  - Gauge faktor: 2..2,2
  - Linearitás (függ a terheléstől):
    - 4000 με-ig kb. 0,1%
    - 25000 με-ig kb. 1%
  - Mérhető legkisebb nyúlás: kb 0,1 με
  - Élettartamuk: 10<sup>6</sup>..10<sup>7</sup>
  - Mérési hőmérséklettartomány: -10..+100..150 °C
- Félvezető bélyegek:
  - Hőmérsékletváltozásra érzékenyebbek.
  - Névleges ellenállásuk 120Ω
  - Gauge faktor: 100..120
  - Linearitás (függ a terheléstől):
    - 1000 με-ig <1%
    - 5000 με felett jelentősen lecsökken
  - Mérhető legkisebb nyúlás: kb 0,001 με
  - Élettartamuk: 10<sup>6</sup> ciklus (1000 με mellett)
  - Mérési hőmérséklettartomány: -55..+ 150 °C
  - Tápfeszültség megválasztásánál vigyázni kell, hogy az áram ne melegítse.
  - Jó mechanikai tulajdonságú (nagy rugalmassági modulusú) és kis hőmérsékleti állandójú bélyeg megválasztására kell törekedni.
  - Kialakításuk:

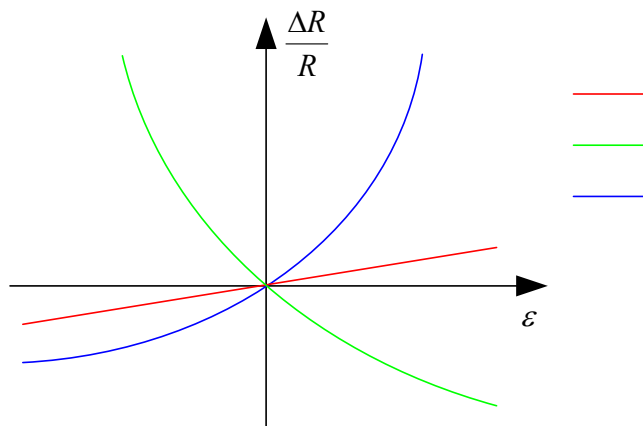
a) Fém



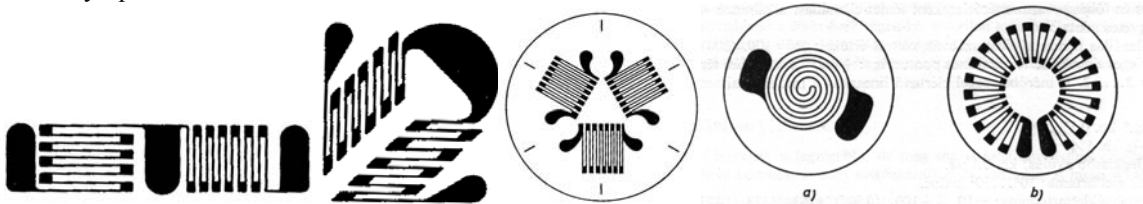
b) Félvezető



- Jelleggörbék:
  - fémzálas – lineáris
  - félvezető – nemlineáris



- Jellegzetes hibák:
  - Kúszás; vagyis, hogy a bélyeg milyen mértékben „fut” együtt a mérőtesttel.
  - Ismétlési, irányváltási hiba.
  - Linearitási hiba.
  - Nullhelyzet hőmérsékletfüggése.
- Néhány típus:



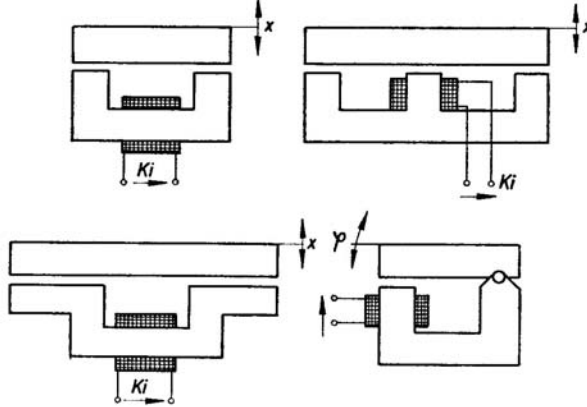
### 1.3. Az induktív úradó

- Induktivitás függ a mágnesköri ellenállástól:

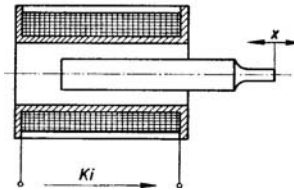
$$L = \frac{N^2}{R_m}, \text{ ahol: } R_m = \int \frac{ds}{\mu A}$$

- $R_m$  változtatható:
  - Légréteg nagyságának változtatásával
  - Vasmagos tekercs induktivitásának változtatásával (merülővasmagos)
  - A relatív permeabilitás változtatásával (magnetoelasztikus átalakító)
- Hátrányok:
  - Relatív nagy tömeg és méret
  - Nehéz gyárthatóság
  - Kisebb megbízhatóság
  - Monolitikus integrált áramköri technológiába nem, hibrid áramkörbe is csak nehezen illeszthető.
  - Hőmérsékletfüggés:
    - Hődilatáció következtében változik a tekercs geometriája, ellenállása
    - A geometria változása miatt változik a menetkapacitás is, ami a komplex veszteséggel és a jósági tényezővel is összefügg.
- A mérőkör váltakozó feszültségű. Jól bevált feldolgozó áramkör a fázisdiszkriminátor. Ezekről később!
- Linearitása függ az elmozdulás mértékétől.
  - Kis elmozdulás: rosszabb felbontóképesség, meredekség és rázásállóság.
  - Nagy elmozdulás: nagyobb szórt induktivitás hatása miatt rosszabb linearitás.

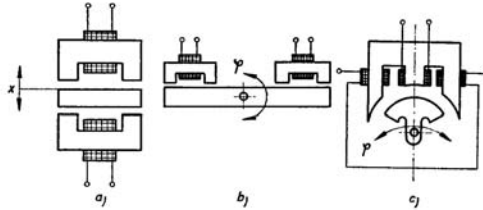
- Lehetnek:
  - Tekercs
  - Egytekercses légrésváltozós (kis elmozdulás)



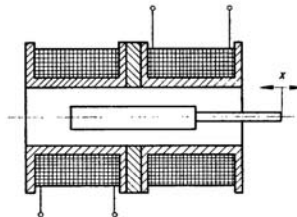
- Merülővasmagos (jellegzetes bemenőjele: nagy elmozdulás)



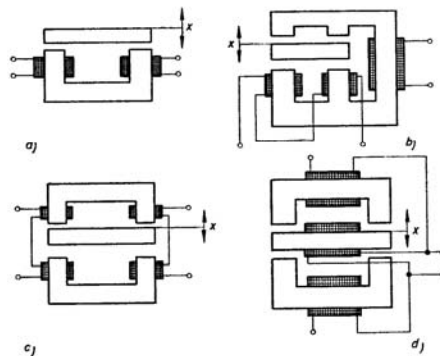
- Kéttékercses (differenciál) típusúak



7.13. ábra. A légrés mágneses ellenállásának változtatásán alapuló differenciál átalakítók  
*a)* bemenőjele kis elmozdulás; *b)* kis szögelfordulás; *c)* szögelfordulás

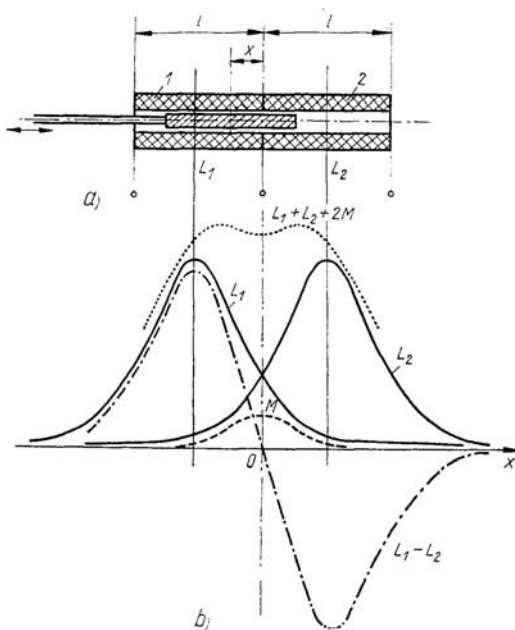


7.14. ábra. Merülővasmagos differenciál átalakító nagy elmozdulásokra



7.15. ábra. Légrésváltoztatásos transzfórtípusú mérőátalakítók

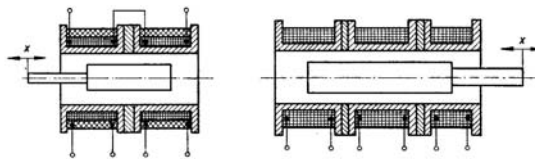
$$U_{ki} = \frac{U_i}{2} \frac{L_1 - L_2}{L_1 + L_2 + 2M}$$



- Transzformátor típusúak

Elvileg az összes kétekerceses (differenciál) tekercestípusú átalakító felhasználható transzformátortípusú átalakítóként, mivel a köztük lévő különbség nem a felépítésükben, hanem a kapcsolástechnikájukban van.

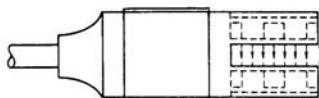
Leggyakrabban a differenciáltranszformátoros átalakítókat alkalmazzák, ahol a primer, vagy a szekunder tekercest, esetleg mindkettőt megosztják.



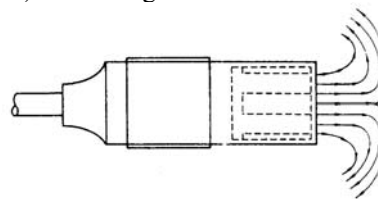
7.16. ábra. Merülővasmagos differenciál-transzformátoros mérőátalakítók  
a) megosztott primer tekercs; b) közös primer tekercs

- Közelítéskapcsolók:

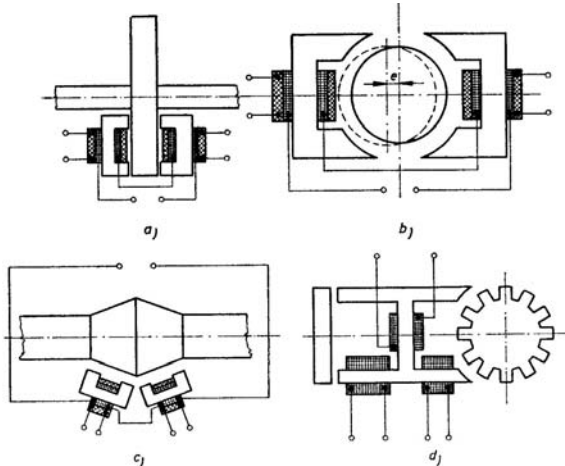
a) Résiniciátor



b) Távolság-iniciátor



- Speciális rendeltetésű differenciál-transzformátoros mérőátalakító

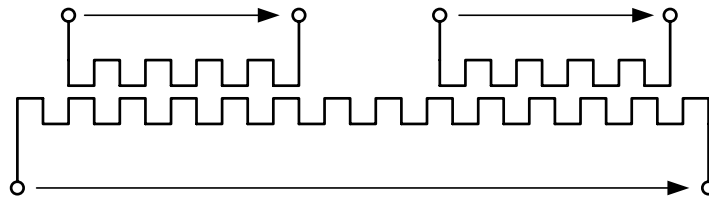


## 1.4. Inductosyn

- Az inductosyn egy huzalozott pályából és csúszkából áll. A két rész kb. 0,1-0,15mm légréssel van egymástól elválasztva.



- A csúszka két tekercset tartalmaz. Ezek egymáshoz képest negyed osztással el vannak tolvá.



- A pálya (állórész) tekercselését néhány kHz-es váltakozó feszültséggel gerjesztik. Ennek hatására a csúszka tekercseiben feszültség indukálódik, amely arányos a csúszka tekercsei és a pálya tekercse közötti kölcsönös induktivitással. Ez az induktivitás pedig arányos a csúszka elmozdulásával. Így a kimenő feszültségek:

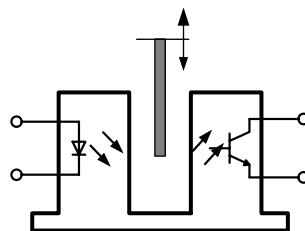
$$u_1 = kU_{be} \sin(\omega t) \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right)$$

$$u_2 = kU_{be} \sin(\omega t) \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right)$$

- A fenti képletekben:
  - k: konstans, a tekercsek közti csatolással arányos
  - p: tekercselés osztása
- A képletekből látható, hogy az inductosyn kimeneti feszültsége szinuszosan változik egy osztáson belül. Az osztások számlálására azonban más eszköz szükséges.
- Az elérhető feloldás: 2-3  $\mu\text{m}$  (szögmérésnél: 0,05')

## 1.5. Optoelektronikus átalakítók

- Transzmissziós optokapu



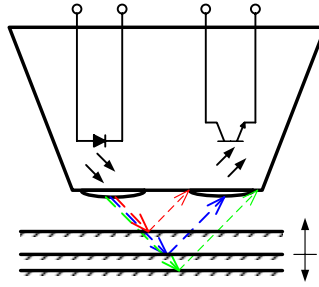
Csúsz

U<sub>1</sub>

U



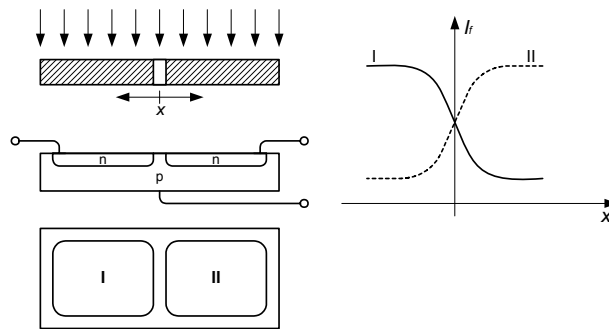
- Reflexiós optokapu



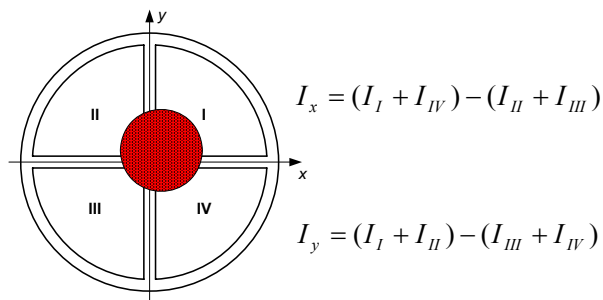
- Mindkét esetben LED-ből és fotótranszisztorból áll
  - A LED-et, 20 mA árammal célszerű terhelni, a kimenet a fotótranszisztor kollektor-emitter feszültsége.
  - Az érzékenység a kollektorköri munkaellenállással állítható.
  - Érzékeny a porra, változó fényviszonyokra.
  - Gyakori a modulált fényforrás
- $E = h\nu, \nu = \frac{c}{\lambda}$

### 1.5.1. Fotodiódás átalakítók

- Iker-fotodióda
- Egy anyagból készül, ezért jó a termikus együttfutásuk
- Pozícióérzékelésre alkalmas



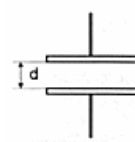
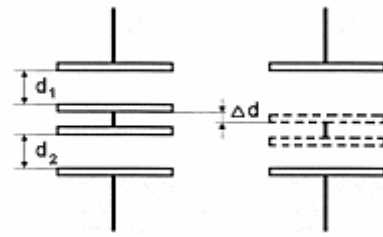
- Kvadráns fotodióda
  - Leggyakoribb alkalmazási területe a CD fej szabályozása



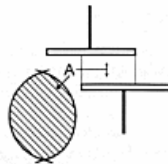
## 1.6. Kapacitív átalakítók

- Tisztán kapacitív, vagy p-n átmenetes félvezetők.
- Elmozdulásmérésre a hagyományos, fémfegyverzetekből felépült kondenzátorok alkalmasak.
- A fegyverzetek közelítése, távolítása a kondenzátor kapacitását növeli, illetve csökkenti, mert:

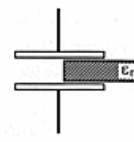
$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{l}$$



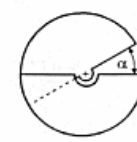
$$C \sim 1/d$$



$$C \sim A$$



$$C \sim \epsilon_m$$



$$C = C_0 + \alpha$$

## 2. A sebesség- és gyorsulásmérés szenzorai

### 2.1. Indukciós átalakítók

- Aktív átalakítók, nem tévesztendő össze a passzív induktív átalakítókkal! Feszültséget hoznak létre, szemben az induktív átalakítókkal, amelyek a tápfeszültséget csak modulálják.
- Az induktív átalakítók a nyugalmi indukción, míg az indukciós átalakítók legnagyobb része a mozgási indukción alapszik.
- **A mozgási indukció:**  $B$  indukcióval jellemzett mágneses térben  $v$  sebességgel haladó  $Q$  töltésre  $F$  erő hat, akkor is, ha  $B$  konstans. Ennek nagysága:

$$F = QBv \sin \alpha$$

$$\frac{F}{Q} = Bv \sin \alpha = E$$

$$U = \int_A^B E ds = \int_A^B Bv \sin \alpha ds$$

- Elvileg az indukciós átalakítók három nagyobb csoportja különböztethető meg:

- **Erővonalmetszés:** a  $B$  indukciójú mágneses tér és a vezető (tekerces) egymáshoz képest elmozdul.

Az  $a$  ábra fix tekercset és az abba merülő állandó mágneset tartalmazó átalakítót mutat. A tekercsen mérhető feszültség az erővonalmetszés sebességével arányos.

A  $b$  ábra az  $a$  ábrával elvileg teljesen azonos.

A  $c$  ábra lényegében a  $b$  ábra szögelfordulásra alkalmas változata.

A  $d$  ábrán a gyakorlatban igen elterjedt váltóáramú fordulatszám-mérő elvi vázlata látható. A sorosan kapcsolt állórész-tekercesekben a többpólusú forgórész forgásának hatására a fordulatszám arányos váltakozó feszültség indukálódik.

Az  $e$  ábrán az ún. indukciós áramlásmérő elvi vázlata látható. Itt csak olyan folyadékok jöhetnek szóba, amelyek vezetőképessége legalább  $80..100 \mu S/cm$ . Az 1, 2 elektródák között indukált feszültség:

$$U = BDv$$

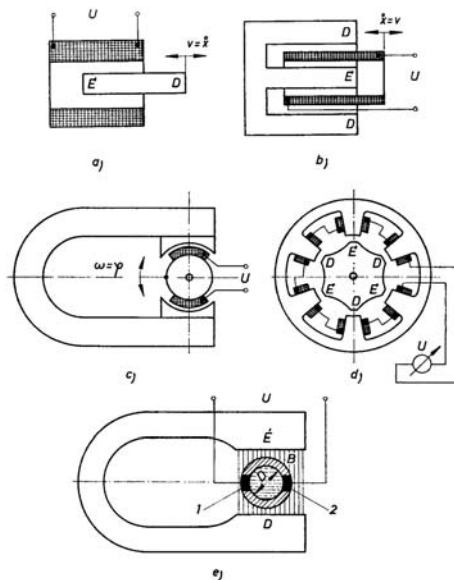
- **Térváltozás:** az indukciós átalakító mágnesköre, és így a mágneses tér ( $B$ ) megváltozik.

Az  $a$  ábrán az állandómágnesen elhelyezkedő tekercsben a járom elmozdulásának hatására feszültség indukálódik, mert az elmozdulással a mágneskör változik, ez maga után vonja a fluxus megváltozását és így, noha itt mozgó vezető álló indukcióvonalat nem metsz, a  $B$  változása értelmében indukálódik feszültség (nyugalmi indukció).

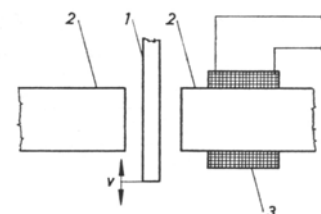
A  $b$  ábra szögelfordulás mérésére alkalmas változat.

- **Örvényáramú**

Ha az állandó mágneses térben egy réz- vagy alumíniumötvözetből lemez mozog, akkor a mozgás hatására benne örvényáramok indukálódnak, amelyek arányosak a lemez mozgási sebességével. Ezen örvényáramok szintén mágneses teret hoznak létre, melynek hatása ellentétes az eredeti, őt létrehozó mágneses térrel. Az eredő mágneses tér a tekercsben feszültséget indukál, amely az örvényáramok változási sebességével, így a mozgó lemez gyorsulásával, arányos.

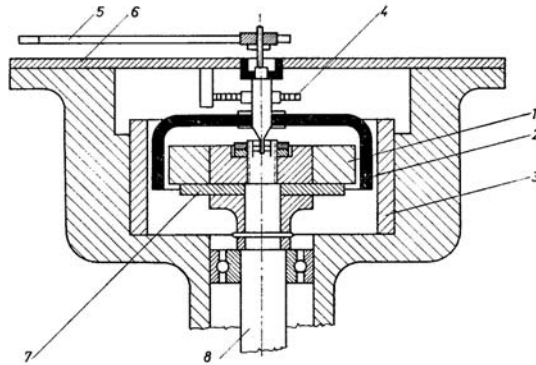


8.2. ábra. A mágneskör változtatásán alapuló indukciós



8.3. ábra. Örvényáramú indukciós átalakító

## Örvényáramú tachométer

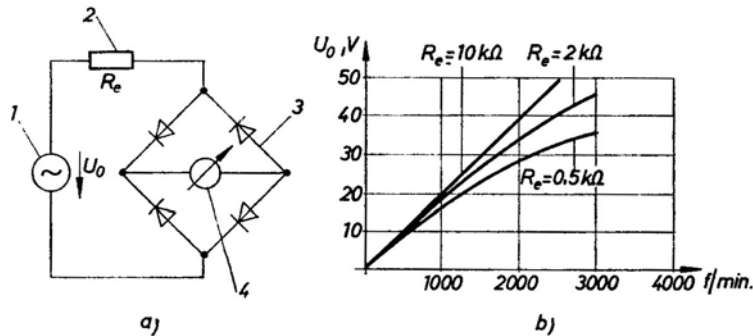


10.6. ábra. Örvényáramú tachométer (Noris nyomán);  
1 Al-Ni mágnes; 2 Al harang; 3 rövidzáró gyűrű; 4 spirálrugó; 5 mutató; 6 skálalap;  
7 thermoperm hőmérsékletkompenzáló tárcsa; 8 mérőtengely

Alkalmazhatók: 20..10000 1/min.  
Pontosságuk: 1..2%-os.  
Hőmérsékletkompenzált!

## Tachogenerátorok

- Egyenfeszültséget előállító tachogenerátorok
  - Kisméretű, egyenáramú generátorok
  - $n=750..2000$  1/min.
  - $U=5..30$  V.
  - 1..4 póluspár, 6..12 kommutátorszelet
- Váltakozófeszültséget előállító tachogenerátorok.
  - $n=150..3000$  1/min.
  - $U=15..150$  V
  - Terhelés hatására a fordulatszámától lineárisan függő kimenő feszültség mind jobban eltér a lineáristól.



10.7. ábra. Váltakozóáramú tachogenerátor kapcsolása (a) és jelleggörbéi (b)  
1 tachogenerátor; 2 előtétellenállás; 3 egyenirányító (Graetz-kapcsolás); 4 mutatóműszer (Depez-műszer)

## 2.2. Számlálástechnikai módszereken alapuló átalakítók

- Mind haladó, mind forgómozgásoknál alkalmazhatók.
- Impulzus-frekvencia mérését tételezi fel.
  - Érintkezős impulzusadó
  - Induktív fog-generátor
  - Belsőégésű motorok gyújtóimpulzusának felhasználása
  - Fényvillamos impulzusadó (optikai rács, lyuktárcsa)

A sebesség, a szögsebesség és a fordulatszám számlálástechnikai mérése

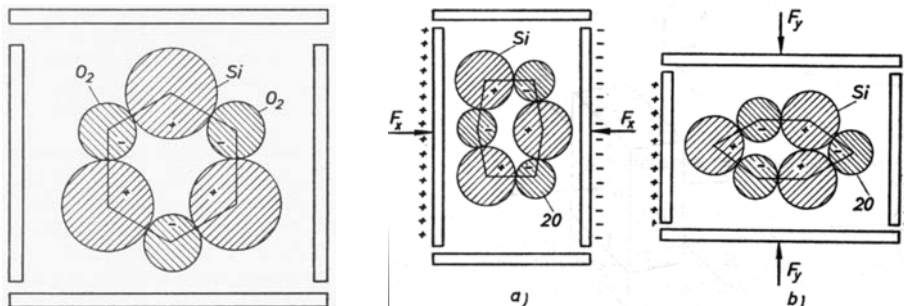
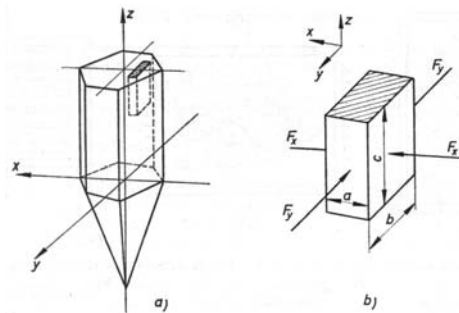
| A mérendő        | A jellemző | Hitelesítési állandó $K_H$ | A sebesség-típusú mennyiség  |
|------------------|------------|----------------------------|------------------------------|
| mozgás           | haladó     | $\frac{1}{p}$              | sebesség $v$                 |
|                  | forgó      |                            | szögsebesség $\omega$        |
| fordulatszám $n$ |            |                            | $\frac{z}{p} \frac{60}{T_M}$ |

Megjegyzés:  $p$  a kiadott impulzusok száma;  $z$  a  $T_M$  idő alatt megszámlált impulzusok száma.

### 3. Gyorsulásmérés

#### 3.1. Piezoelektromos átalakítók

- A Curie-fivérek 1880-ban figyelték meg, hogy egyes ásványi anyagok, mint pl. a kvarc, turmalin, báriumtitanát, Seignette-só, stb., mechanikai feszültségi állapot hatására villamosan polarizálódnak és felületükön villamos töltést halmoznak fel.
- Számos igen előnyös tulajdonsága miatt piezoelektromos átalakítók céljára szinte kizárólag kvarcot ( $\text{SiO}_2$ ), annak természetes, vagy mesterséges formáját használják fel.
  - A kvarc előnyös tulajdonságai:
    - Igen nagy nyomószilárdság  $3,92 \text{ N/m}^2$
    - Viszonylag nagy ellenállóképesség hőmérsékleti hatások ellen, mintegy  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ -ig a piezoelektromos tényező kismérvű hőmérsékletfüggése
    - Nagy linearitás, hiszterézis nélkül
    - Igen nagy szigetelési ellenállás, kb.  $10^{14} \Omega$
- A kvarc hexagonális rendszerben kristályosodik. A kristályban  $x$  (villamos),  $y$  (semleges, vagy mechanikai),  $z$  (optikai) tengelyeket különböztetünk meg. Az  $x$  tengelyre merőleges felületen jelenik meg a töltés,  $y$  tengely irányában a kristálynak semmilyen kitüntetett sajátossága nincs, a  $z$  tengely irányában pedig az optikai tulajdonságok meghatározottak.
- Ha a kvarckristályból oly módon vágnak ki egy téglateetet, hogy annak lapjai párhuzamosak a fő tengelyekkel, akkor az optikai tengelyre merőlegesen ható erők hatására villamos polarizáció lép fel. Az  $x$  irányú terhelés longitudinális, az  $y$  irányú terhelés pedig transzverzális piezoelektromos hatást hoz létre.



- Terhelés hatására a hexagonális rácsszerkezet deformálódik. Az  $a$  ábrán a longitudinális, a  $b$  ábrán a transzverzális piezoelektromos hatás látható.
- A longitudinális hatás jellemzői:
  - A töltések az erő támadási felületén gyűlnek össze.
  - A keletkező töltés nem függ a kvarc geometriai méretétől, csak az erő nagyságától.
  - A keletkező töltés növelését mechanikailag soros, villamosan párhuzamosan kapcsolt kvarclemezekkel megoldani. Ennek hátrányos tulajdonságai is vannak, nevezetesen, hogy romlik a linearitás és hátrányos gyors hőmérséklet változások esteében is. Ezért a transzverzális hatást is kihasználják.
- A transzverzális hatás jellemzői:
  - Függ a geometriai méretektől.
  - Az erő hatásvonalára merőleges felületen jelennek meg a töltések.
- A fordított hatás az elektrostrikciónak.

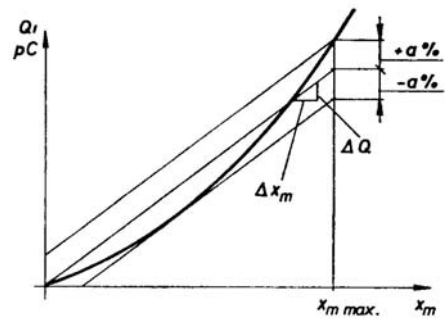
#### A piezoelektromos mérőrendszer pontosságával kapcsolatos kérdések

- Az átalakító pontossága az ún. hitelesítési jelleggörbéből határozható meg – töltés= $f$ (méréndő mennyiség)
- A hitelesítési jelleggörbéből az érzékenység is adódik:

$$\dot{E} = \frac{dQ}{dx_m} \approx \frac{\Delta Q}{\Delta x_m}$$

- Elméleti egyenes: legkisebb négyzetek módszerével. Át kell, hogy haladjon az origón, mert aktív átalakító!
- Linearitás:  $\pm a\%$ . Széles tartományban igen jó.

- $a$  értéke hőmérsékletfüggő, mert az átalakító hőmérsékletváltozás hatására az érzékenységet változtatja. Ennek oka, hogy növekvő hőmérséklet hatására a kvarc piezoelektromos tényezője csökken.
  - Az érzékenységsökkenés kb.: 0,01..0,02 %/K
  - A nagy hőmérsékletkülönbségek veszélyesek, ilyenkor hőmérsékletkompenzációt alkalmaznak. Különösen veszélyes a hősokk, ez ellen hőszigetelt alátétet lehet alkalmazni.
  - Termikus lökésekre a transzverzális átalakítók kevésbé érzékenyek, mint a longitudinálisak.
- Nem kívánt gyorsulások hatására bekövetkező mérési hibát gyorsuláskompenzáló taggal lehet kivédeni.



8.19. ábra. Piezoelektromos átalakító hitelesítési jelleggörbéje

Közvetett mérés! Gyorsulásmérésnél egy hiteles, ún. szeizmikus tömrege ható tehetetlenségi erő arányos a tömeg gyorsulásával (Newton II.). a gyorsulásmérő lényegében egy mechanikai lengőrendszer, amelynek hiteles tömegére a tehetetlenségi erő mint kitérítő, valamilyen rugó, vagy súly pedig mint visszatérítő erő hat.

### 3.2. Közvetett mérések:

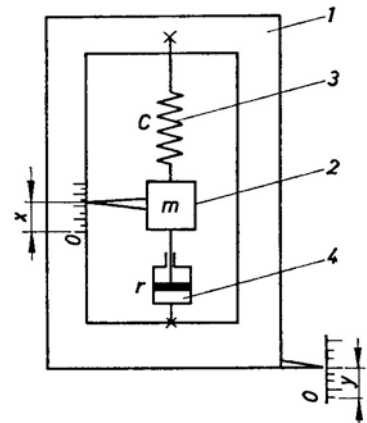
Másodrendű, soros lengőrendszer egyenletei:

$$\ddot{x} + 2\xi\alpha\dot{x} + \alpha^2 x = -a,$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

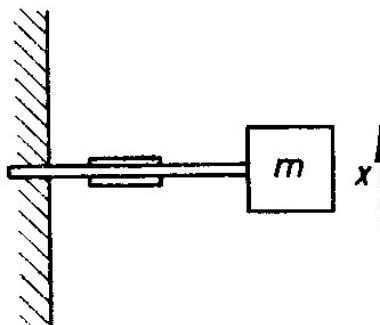
$$\xi = \frac{b}{2} \sqrt{\frac{1}{mk}}$$

1. Nagy tömeg, kis csillapítási tényező, kis rugómerevség: Útérzékelő rendszer
2. Kis tömeg, kis rugómerevség, nagy csillapítási tényező: Sebességérzékelő rendszer
3. Igen nagy rugómerevség, kis tömeg és kis csillapítási tényező: Gyorsulásérzékelő rendszer

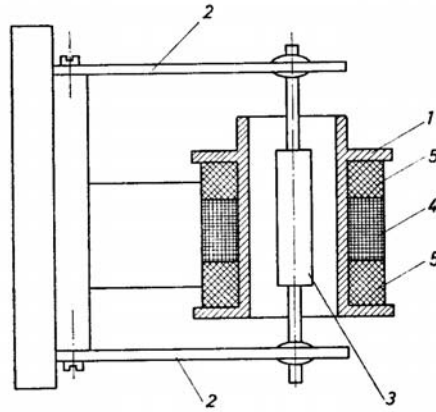


### 3.3. Gyorsulásmérő eszközök:

- Nyúlásmérő bélyeges

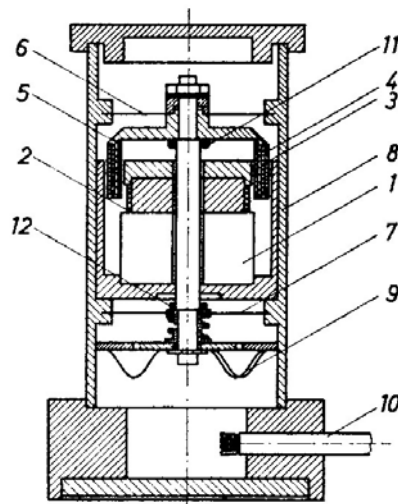


- Induktív



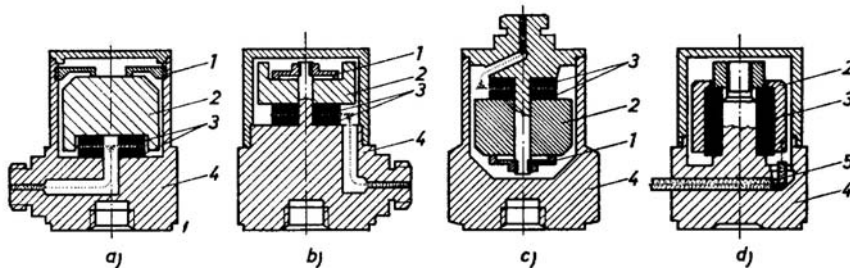
10.13. ábra. Induktív rezgésmérő  
1 differenciáltranszformátor; 2 laprugók; 3 merülő-  
mag (tömeg); 4 primer tekercs; 5 szekunder tekercsek

- Indukciós gyorsulásmérő



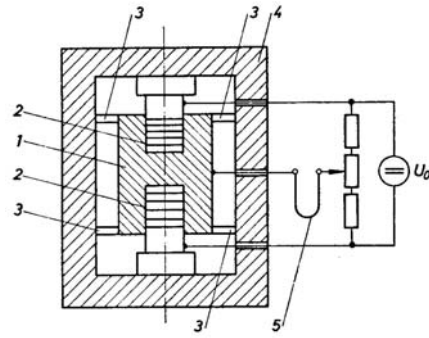
10.15. ábra. Szeizmikus elektrodinamikus (indukciós) rezgésmérő  
(Philips)  
1 állandó mágnes; 2 korrekciós tekercs; 3 mérőtekercs; 4 csilla-  
pítótekercs; 5 csillapító henger; 6, 7 membrán; 8 ház; 9 kiveze-  
tések; 10 háromeres árnyékoló kábel; 11, 12 végállásútközpök

- Piezoelektromos gyorsulásmérő



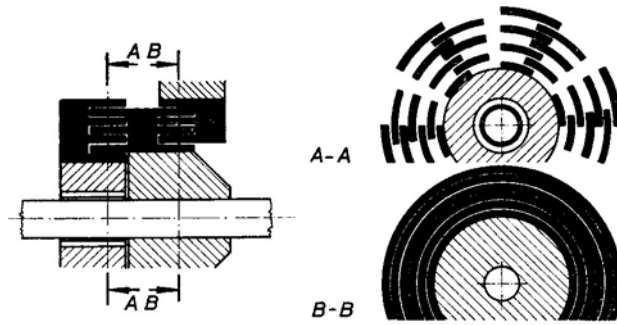
10.17. ábra. Szeizmikus piezoelektromos gyorsulásmérők különféle kivitelei (Brüel & Kjaer)  
a) kerületen előfeszített; b) központilag előfeszített; c) központilag előfeszített fordított; d) nyírásra  
igénybevett piezoelektromos kristály  
1 rugó; 2 tömeg; 3 piezokristály; 4 alaplemez; 5 kábelcsatlakozás

- Szénoszlopos gyorsulásmérő



10.16. ábra. Szénoszlopos gyorsulásmérő és mérőköre  
 1 szeizmikus tömeg; 2 szénoszlopok; 3 a mozgó tömeg vezetése; 4 ház; 5 oszcillográfurok

- Kapacitív



10.14. ábra. Torziós rezgésmérő kapacitív mérőátalakítóval (DISA)



## 4. Az erő-, nyomaték-, és nyomásmérés szenzorai

- Közvetett (valamilyen közbenső mennyiség mérésével) vagy közvetlen mérési elvek léteznek.
- Közvetlen mérési eljárások:
  - átmeneti ellenállásos,
  - magnetoelasztikus,
  - piezoelektromos átalakítók.

### 4.1. Átmeneti ellenállásos átalakítók

- Két kapcsolóérintkezőt  $F$  erővel összeszorítva a közöttük mérhető egyenáramú ellenállás a tapasztalat szerint:

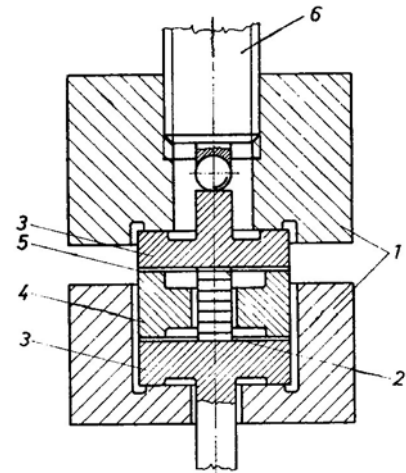
$$R = \frac{k}{F^c}$$

ahol:  $k$  – az érintkezők anyagától,  
 $c$  – a geometriai kialakítástól függő tapasztalati állandók.

- Általában szén alkalmaznak ( $k = 1,5..3,5 \Omega N$ )
- Sík érintkezők esetében  $c = 1$ .
- Általában előfeszített (0 helyzet körüli határozatlan érték elkerülése végett)
- Ellenállásváltozást több korong alkalmazásával (soros kapcsolásával) lehet növelni, ekkor, ha  $c = 1$ :

$$R = \frac{(n-1)k}{F + F_0}$$

- Az elv csak nyomóerők mérésére alkalmas.



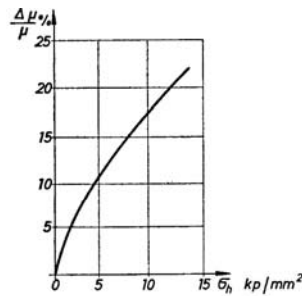
11.1. ábra. Szénoszlopos nyomóerőmérő-cella

1 ház; 2 szénoszlop; 3 membrán; 4 távtartó; 5 csillámlemez (0,01 mm); 6 az előfeszítést beállító csavar

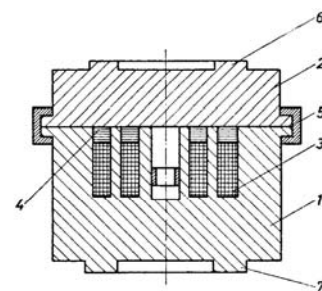
### 4.2. Magnetoelasztikus átalakítók

- Ferromágneses anyagnak mechanikai feszültség hatására változik a mágneses permeabilitása
- Mind húzó, mind nyomófeszültségek leképezésére alkalmas.
- Csavaró igénybevételnél is fellép, ezért nyomatékmérésre is alkalmas.

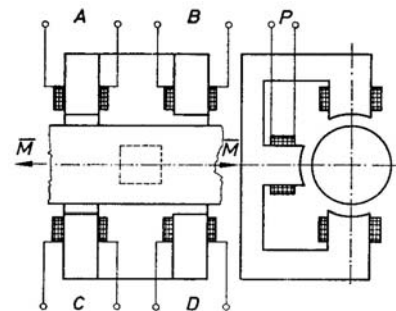
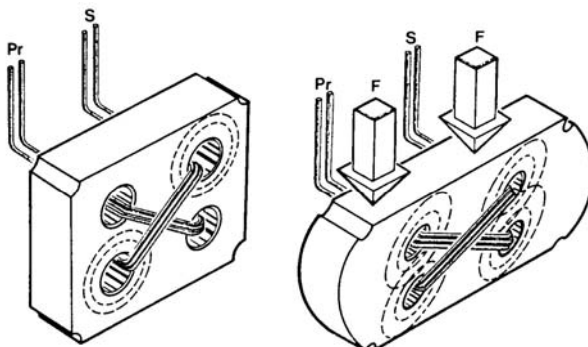
Erőmérés:  $10^3..10^{10}$  N  
 Nyomatékmérés:  $1..10^5$  Nm



7.18. ábra. A húzófeszültség befolyása a permeabilitás változására Ni-Fe ötvözetnél (Janowsky nyomán)



7.19. ábra. Magnetoelasztikus erőmérőcella  
 1 nyomótest; 2 fedél; 3 tekercs; 4 acélgyűrű; 5 behengerelt rögzítő gyűrű; 6, 7 felfekvő gyűrűfelületek

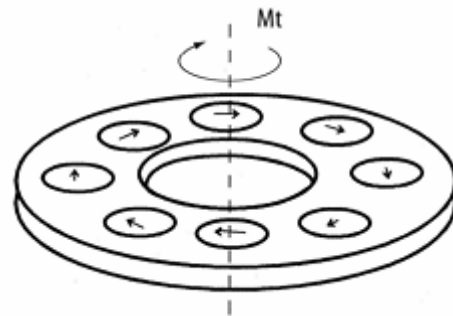
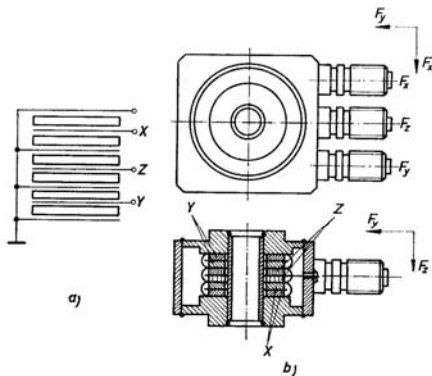


11.2. ábra. Magnetoelasztikus nyomatékmérő (Beth és Meeks)

P primer tekercs; A, B, C, D szekunder tekercsek

### 4.3. Piezoelektromos erőmérők

- Mind húzó, mind nyomó feszültségek leképezésére alkalmas.
- Egy- és több összetevős mérésekre is alkalmas
  - Több összetevős mérésre több, a kvarckristályból különböző irányokban kihasított kvarclemezt tartalmazó eszközök alkalmasak
- A longitudinális és a transzverzális hatás mellett létezik torziós hatás is, ezt nyomatékmérőkben lehet alkalmazni.



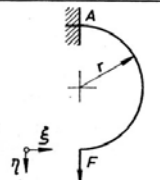
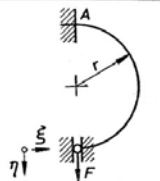
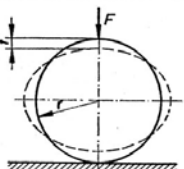
11.3. ábra. Háromösszetevős piezoelektromos erőmérőcella  
a) elvi kapcsolása; b) kiviteli alakja; X—x irányú, Y—y irányú, Z—z irányú erő összetevőket érzékelő kvarclemepárok

### 4.4. Közvetett leképezésű módszerek

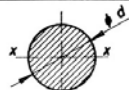
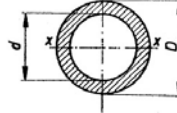
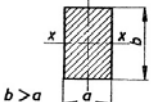
- Összehasonlításon (dugattyús nyomásmérő, mérleg, stb.), vagy
- Rugalmas deformáción alapulnak.

#### Hajlított mérőtestek méretezése alakváltozásra

| Egyenes rudak        |  |  |
|----------------------|--|--|
| Koncentrált erő      |  | lehajlás $f = \frac{Fl^3}{3IE}$ ;<br>szögelfordulás $\varphi = \frac{Fl^2}{2IE}$   |
|                      |  | lehajlás $f = \frac{Fl^3}{48IE}$ ;<br>szögelfordulás $\varphi_A = \varphi_B = \frac{Fl^2}{16IE}$   |
|                      |  | lehajlás $f = \frac{Mo l^2}{2IE}$ ;<br>szögelfordulás $\varphi = \frac{Mo l}{IE}$  |
| Koncentrált nyomaték |  | lehajlás $f_{max} = 0,0641 \frac{Mo l^2}{IE}$ ;<br>a lehajlás maximuma az $x = 0,577l$ helyen van.<br>$\varphi_A = \frac{Mo l}{6IE}$ ;<br>$\varphi_B = 2\varphi_A$ |
|                      |  | lehajlás $f_{max} = \frac{Mo l^2}{8IE}$ ;<br>szögelfordulás $\varphi_A = \varphi_B = \frac{Mo l}{2IE}$   |

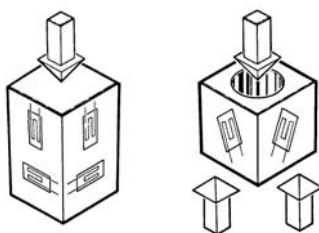
|                      |   |  |
|----------------------|---|--|
| Koncentrált erőhatás |  | $\xi = 2 \frac{Fr^3}{IE}$ $\eta = \frac{1}{2} \frac{Fr^3}{IE}$ |
|                      |  | $\xi = 0$ $\eta = 0,72 \frac{Fr^3}{IE}$                        |
|                      |  | $f = \frac{0,148Fr^3}{IE}$                                     |

Másodrendű nyomatékok és keresztmetszeti tényezők

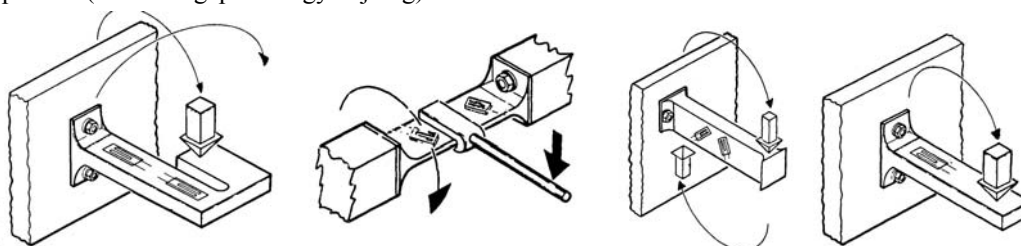
| Keresztmetszet  | Másodrendű nyomaték (x-x tengely)  | Keresztmetszeti tényező                    | Poláris másodrendű nyomaték (0-pont) | Poláris keresztmetszeti tényező                                  |
|---|------------------------------------|--|--------------------------------------|--|
|    | $I_x = \frac{d^4\pi}{64}$          | $W_x = \frac{d^3\pi}{32}$                  | $I_p = \frac{d^4\pi}{32}$            | $W_p = \frac{d^3\pi}{16}$  |
|  | $I_x = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4)$ | $W_x = \frac{D^4 - d^4}{D} \frac{\pi}{32}$ | $I_p = (D^4 - d^4) \frac{\pi}{32}$   | $W_p = (D^4 - d^4) \frac{\pi}{16}$                               |
|  | $I_x = \frac{ab^3}{12}$            | $W_x = \frac{ab^2}{6}$                     | —                                    | $W_{p \min} = \frac{2a^2b}{9}$<br>$W_{p \max} = \frac{2b^2a}{9}$ |

### 4.5. Erőmérő cellák

- Húzó-nyomó cellák (kizárólag mérőelem)



- Csapcellák (mérő- és gépelem egyidejűleg)

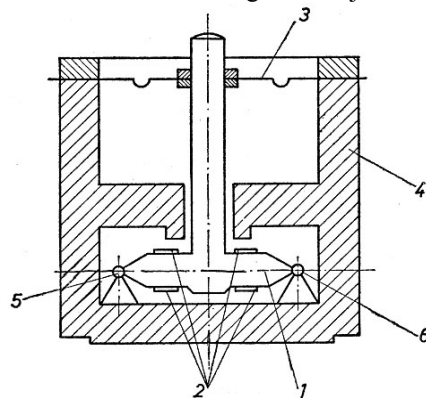


- A mérőcellák egyik legfontosabb tényezője a cellatényező. Ennek ismeretében a tápfeszültség és a kimeneti jelfeszültség ismeretében egy, a cellára ható ismeretlen erő meghatározható. A kiszámításhoz a következő

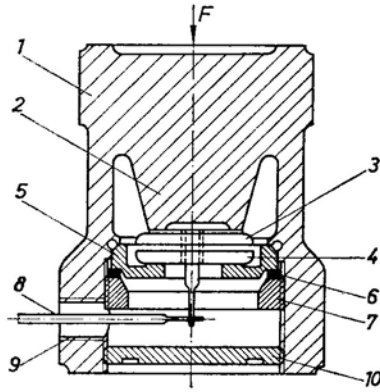
$$\text{használható: } U_{jel} = U_{táp} C \frac{F}{F_{névleges}} .$$

A névleges terhelés az a maximális erő, amelyre a cella készült.

- A cellák általában 150%-ig túlterhelhetők, ezután maradó alakváltozás következik be.
- A cellatényező a névleges terhelésnél és a terheletlen állapotokban mért jelfeszültségek különbségének és a tápfeszültségnek a hányadosa.
- Hibaforrások:
  - Terheléssel arányos:
    - A cellatényező tőrése
    - A cellatényező hőmérsékletfüggése
    - A kúszás
  - Terheléstől független:
    - Linearitási hiba
    - Nullhelyzet hőmérsékletfüggése
  - Terheletlen állapotban a mért jelfeszültség elvileg nulla, azonban a gyakorlatban van egy offset hiba, amely precíz mérlegcella esetében elhanyagolhatóan kicsi.
  - Hőmérsékletfüggés. Meghatározható a cellatényezőre és a nullhelyzetre. A cellatényező hőmérsékletfüggése értékének 10K hőmérséklet-változás hatására való változása a névleges terhelésnél mért jelfeszültség százalékában kifejezve. A nullhelyzet hőmérsékletfüggése a mérőcella jelfeszültségének 10K hőmérséklet-változás hatására való megváltozása terheletlen állapotban a névleges terhelésnél mért jelfeszültség százalékában kifejezve.
  - Kúszás. Ez az adat arra ad információt, hogy a bélyeg milyen mértékben fut együtt a mérőtesttel, illetve deformációja milyen mértékben marad le az acél mérőtesttől. A kúszás ugyanis a mérőcella jelfeszültségének változása névleges terhelésnél 30 perc alatt. Értékét a névleges terhelésnél mért jelfeszültség százalékában kell megadni.
  - Ismétlési hiba, irányváltási hiba.
  - Linearitási hiba. Az elméleti egyenestől való eltérés maximuma, szintén a névleges terhelésnél mért jelfeszültség százalékában.
  - A linearitási, ismétlési és irányváltási hibák négyzetes középértéke a mérés alaphibája, a cella pontosság osztályát határozza meg.
- Beépítésnél ügyelni kell a mérőcella tengelyének és a terhelés tengelyének egybeesésére. Különben csökken a cellatényező, illetve az oldalirányú erők következtében károsodhat a cella.
- Dinamikus terhelésnél figyelembe kell venni a cella rugóállandóját.



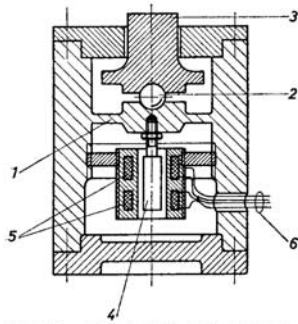
## 4.6. Kapacitív átalakítók



11.21. ábra. Felütközöhengeres kapacitív erőmérőcella nagy erők méréséhez

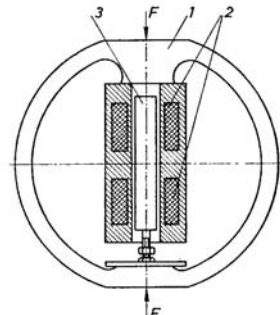
1 felütközöhenger; 2 hengeres tömegrész; 3 mozgó lemez; 4 álló lemez; 5 tartógyűrű; 6 közgyűrű; 7 csavarógyűrű; 8 villamos hozzáférés; 9 kábelcsatlakozás; 10 csavaros fedél;  $F$  mérendő erő

## 4.7. Induktív átalakítók



11.17. ábra. Példa induktív leképezésű deformációs erőmérőre

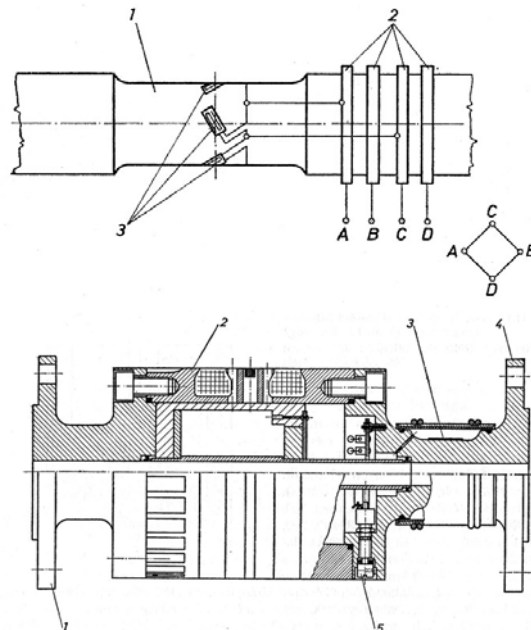
1 hajlított mérőtest; 2 érintőgolyó; 3 nyomólap; 4 mérőlévismag; 5 tekercsek; 6 hozzáférés

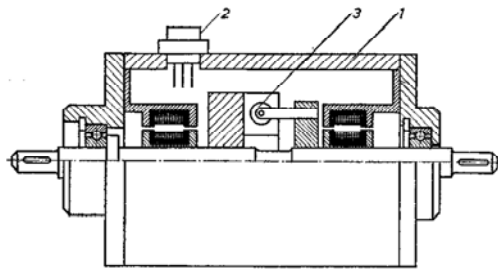


11.18. ábra. Induktív gyűrűs erőmérő

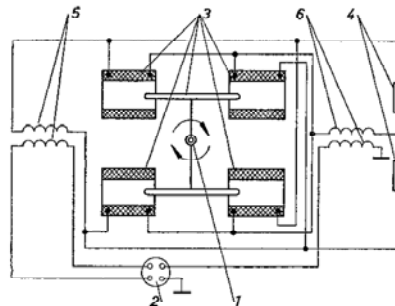
1 gyűrű; 2 tekercsek; 3 mérőlévismag

## 4.8. Nyomatékmérés



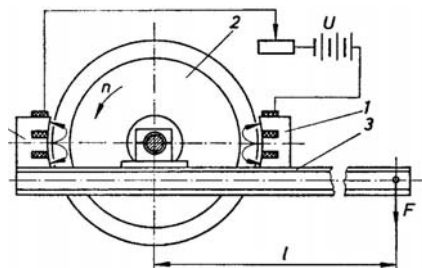


aj



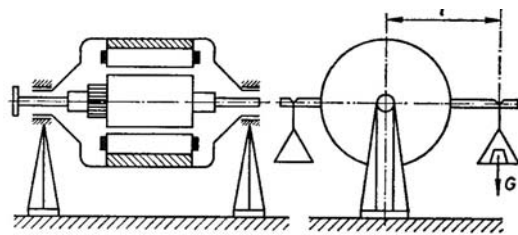
#### 4.9. Erősáramú eszközök használata nyomatékmérésre

- Örvényáramú fék



11.22. ábra. Örvényáramú fék  
1 mágnesek; 2 vezetőtárcsa; 3 mérlegkar

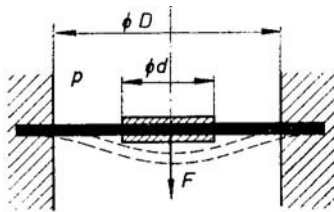
- Mérleggép



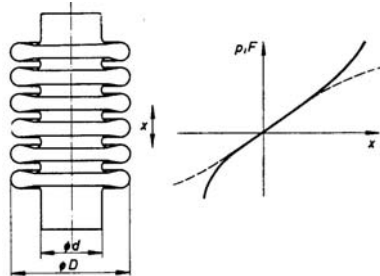
11.23. ábra. A mérlegdinamó elve

## 5. Nyomásmérés

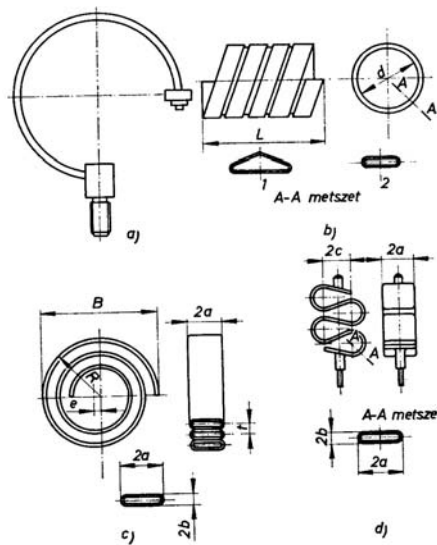
- Általában közvetett mérés
- Közvetlen mérések: dugattyús mérés, ismert fajsúlyú folyadékoszlop hosszának mérése
- Követelmények:
  - Lehetőleg mind állandó, mind váltakozó üzemmódokban lehessen mérni
  - A nyomásérzékelő pneumatikus, ill. hidraulikus kapacitása kicsi legyen.
  - Folyamatos regisztrálás lehetősége
- Harangos nyomásmérő
- Membrános nyomásmérők
  - Laza membrános



- Szilfon membrános

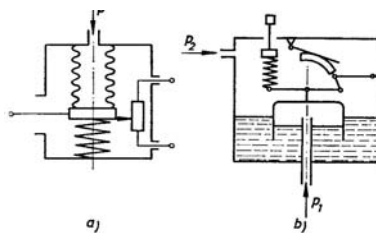


- Mindkét esetben:
  - Nagy túlterhelhetőség
  - Rezgésekkel szemben való érzéketlenség (kis tömeg miatt)
  - Hátrányuk a hiszterézis,
  - és a hőmérsékletfüggés.
  - Effektív felület csak mérés útján határozható meg pontosan.
- Csőrugó kialakítások



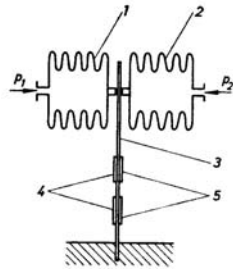
13.8. ábra. Csőrugók kiviteli alakjai  
 a) egyszerű csőrugó (Bourdon-cső); b) helikoid; c) spirál;  
 d) S-alakú csőrugó

- Nyomásmérő eszközök:
  - Potenciométeres

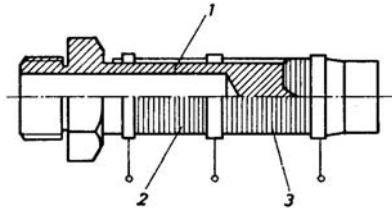


13.9. ábra. Potenciométeres leképezésű nyomásmérők  
 a) csőrugós érzékelés; b) harangos érzékelés

- Nyúlásmérő bélyeges

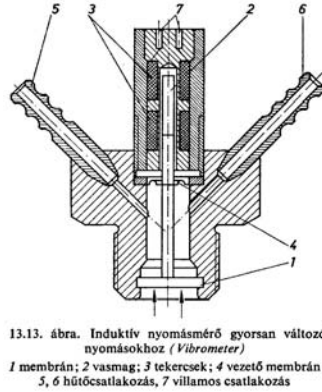
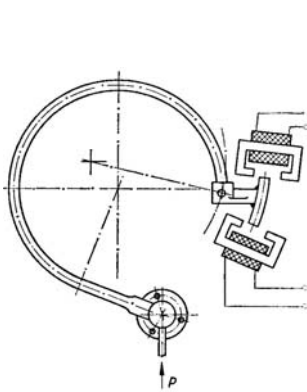


13.10. ábra. Csőmembrános nyomáskülönbségmérő hajlításra igénybevevett segédmeőrősttel  
1, 2 csőmembrán (mérőtestek); 3 hajlított rugó (segédmeőrőst); 4, 5 nyúlásmérőbéllyegek

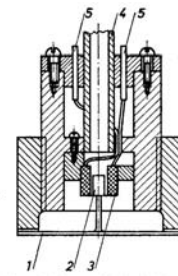


13.11. ábra. Csöves mérőelemű nyúlásmérőbéllyeges nyomásmérő  
1 érzékelőcső; 2 aktív; 3 kompenzáló béllyegek

- Induktív

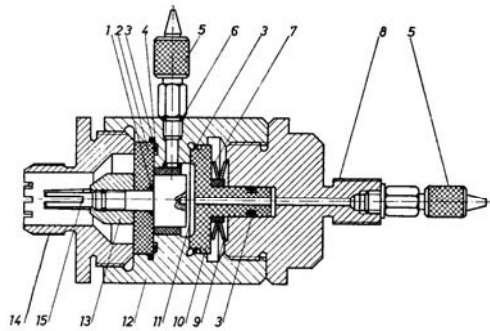


13.13. ábra. Induktív nyomásmérő gyorsan változó nyomásokhoz (Vibrometer)  
1 membrán; 2 vasmag; 3 tekercsek; 4 vezető membrán; 5, 6 hűtőcsatlakozás, 7 villamos csatlakozás

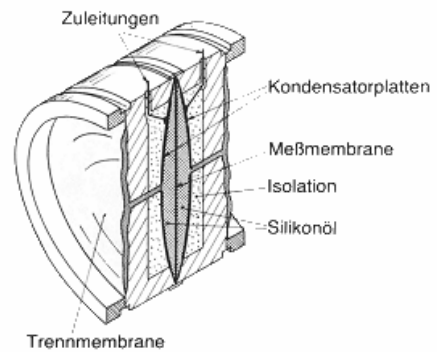


13.14. ábra. Schaevitz-féle induktív nyomásmérő  
1 membrán; 2 vasmag; 3 tekercs; 4 ellennyomás-csatlakozó; 5 villamos kivezetések

- Kapacitív

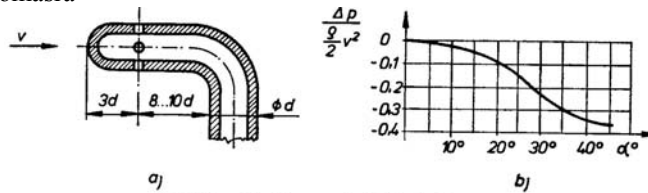


13.15. ábra. Kapacitív nyomásmérő metszete (DISA)  
1 0-gyűrű; 2 szigetelés; 3 0-gyűrű; 4 távtartó; 5 csőcsatlakozó; 6 alátét; 7 alátét; 8 fedél; 9 távtartó; 10 szorítógyűrű; 11 membrán; 12 ház; 13 központozító; 14 nagyfrekvenciás csatlakozó; 15 elektróda



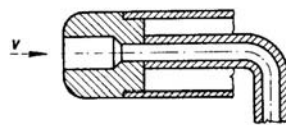
- Szondák

- Statikus nyomásra



13.17. ábra. Statikus szonda és irányérzékenysége  
a) statikus szonda; b) a szonda irányérzékenysége

- Össznyomásra



13.18. ábra. Az össznyomás kivezetése Pitot-csővel



## 6. Hőmérsékletmérés

### 6.1. *Ellenállásváltozáson alapuló érzékelők*

#### 6.1.1. Ellenálláshőmérők (termorezisztorok)

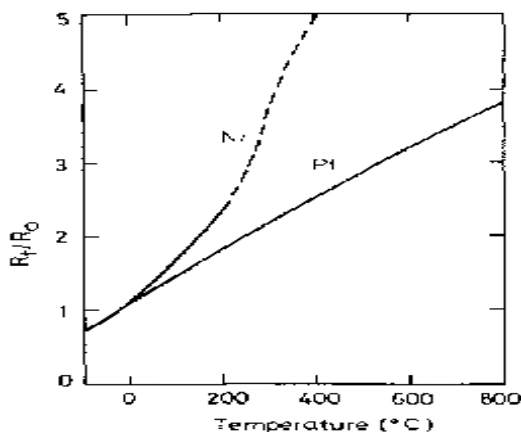
- Hőellenállásnak akkor nevezünk egy villamos áramtól átjárt vezetőt ha a mérés céljaira azt a tulajdonságát használjuk fel, hogy ellenállása a hőmérséklettől függ.
- A fémeknek általában pozitív hőmérsékleti tényezőjük van ( $\alpha$ ), ami azt jelenti, hogy fajlagos ellenállásuk ( $\rho$ ) a hőmérséklet növekedésével növekszik.
- Fémek esetében  $\rho(T)$  általában nemlineáris, emiatt a függvényt végtelen sorának két első tagjával közelítjük.

$$\rho_T = \rho_0 [1 + \alpha (T - T_0)]$$

- A fenti egyenlet csak egy korlátozott hőmérsékleti tartományban ad kielégítő közelítést, azaz különböző tartományokban más-más  $\alpha$  érték érvényes.
- Az  $\alpha$  érték gyakorlati számítása (100K hőmérséklettartományra):

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \frac{R_{100} - R_0}{100}$$

- $\alpha$  értéke nem túl nagy szám, így az eszköz meredeksége kicsi.
- a gyakorlatban az ellenálláshőmérők anyagául a nikkelt és a platina a legelterjedtebb.



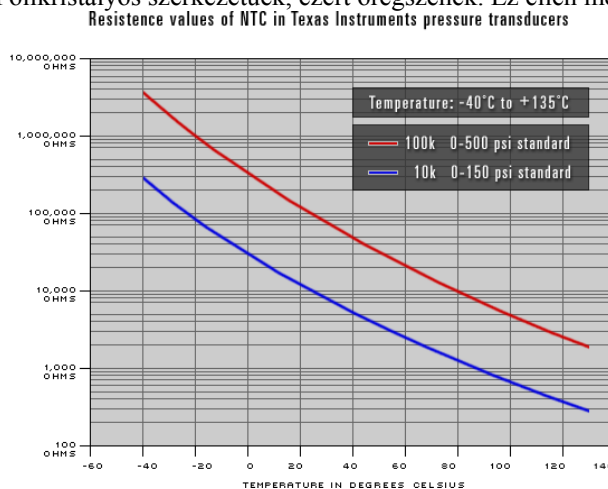
- $\alpha$  értéke nikkelt esetében kedvezően nagy (0,006 1/°C), viszont a hőmérséklet-állósága nem kedvező (magasabb hőmérsékleten korrodál). Így a nikkelt hőellenállások 100...150 °C-nál magasabb hőmérsékleten nem használhatók
- A platina meredeksége alig több mint fele a nikkelné (0,00351 1/°C). Korróziós tulajdonsága – lévén nemesfém – nagyon kedvező. A Ni nem állítható elő nagy tisztaságban, ezért egyedi kalibrálás szükséges.
- A fémhőmérőkkel a negatív hőmérséklet tartományban is jól lehet mérni, nikkelt ellenállással –60 °C-ig, platinával –200 °C-ig.
- A hőellenállások névleges 100  $\Omega$ -os ellenállása 0 °C-on értendő.
- Linearitásuk kb. 2%, pontosabb mérésre termoelementet használunk.
- Az ellenálláshőmérők legtöbbször kerámiatestre tekercselt fémhuzalból készül. A kellő mechanikai stabilitás érdekében az érzékelő szigetelten egy fémtokban (lezárt végű csőben) helyezkedik el.
- A fém védőcső anyagának megválasztásánál ügyelni kell arra, hogy lehetőleg megegyezzen a mérőtér falának anyagával, az elektrokémiai korrózió elkerülése érdekében.
- A fémhuzalos kialakításon kívül léteznek ún. vastagréteg pasztával kialakított hőmérők. Ezek alapja valamilyen termorezisztív paszta, amelyet szitanyomtatással visznek fel egy hordozó felületre.
  - Ezek tulajdonságai a következő táblázatban találhatóak.

| Anyag | Tk<br>[ppm/°C] ( $\alpha$ ) | Hőmérsékleti tartomány [°C] |
|-------|-----------------------------|-----------------------------|
| Pt    | 3500                        | (-200)...700                |
| Ni    | 6445                        | (-50)...0...200             |
| Au    | 2840                        | 0...700                     |
| Pd-Au | 27                          | 0...700                     |
| Cu    | 3500                        | 0...200                     |

- A vastagréteg hőmérők lehetnek meander ( $C < 25\text{pF}$ ) kialakításúak, vagy készülhetnek hengeres konstrukcióban.
  - Az utóbbinak fő előnye, hogy csereszabatos a hagyományos tekercselt ellenálláshőmérőkkel.
  - Ezenkívül kedvezőek a dinamikus tulajdonságai, mivel az érzékelő felület az érzékelő felszínén van és nagysága tetszőleges lehet.
  - Induktivitásuk:  $L < 1\ \mu\text{H}$ , kapacitásuk:  $C < 10\text{pF}$
  - A vastagréteg hőellenállások alapellenállását trimmereléssel lehet beállítani.
  - Hátrányuk a viszonylag nagy méret (meander-kialakítás) és hogy a hőmérsékleti együttható csak pozitív lehet.

## 6.1.2. Termisztorok

- A termisztorok félvezető eszközök.
- Két fő típusuk létezik:
  - NTC (NTK) – Negative Thermal Coefficient: negatív hőmérsékleti együtthatójú érzékelők. A negatív hőmérsékleti együttható csak félvezető eszközökkel valósítható meg. Az érzékelő ellenállása a hőmérséklet növekedésével csökken.
    - Az NTK termisztorok fémoxid keverékből, szintereléssel készülnek.
    - Polikristályos szerkezetűek, ezért öregsznek. Ez ellen meseterségesen öregbitik.



- Hőmérséklet-ellenállás karakterisztikája:

$$R(T) = R_{\infty} e^{\frac{B}{T}}$$

$$B = \frac{T_2 T_1}{T_2 - T_1} \ln \frac{R_1}{R_2}$$

$$R_{\infty} = R_1 e^{-\frac{B}{T_1}}$$

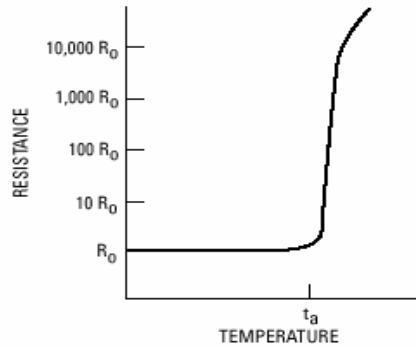
- B: hőmérséklet érzékenységi index
- Gyakran:  $R_1 = R_{20}$ , és  $R_2 = R_{100}$ . Ezekkel a gyakorlatban használt képlet:

$$R_1 = R_2 e^{\frac{B(T_2 - T_1)}{T_2 T_1}}$$

$$R_{20} = R_{100} e^{0,04B}$$

- $T_{\text{MAX}}$  felett tönkremegy!
  - Áram-feszültség karakterisztikájuk kezdeti szakaszán az Ohm-törvény érvényesül,  $U_{\text{max}}$  felett a feszültség hatására kialakuló áram a termisztor a környezeti hőmérséklet fölé hevíti.
- PTC (PTK) – Positive Thermal Coefficient: Pozitív hőmérsékleti együtthatójú eszközök. Jellemző rájuk a hőellenállásnál sokkal meredekebb karakterisztika és a nemlinearitás. Gyakori alkalmazási területe a túlterhelés-védelem motoroknál.
    - Polikristályos BaTi, kis mennyiségű fémoxiddal.
    - Ferroelektromos hatáson alapul:

- A polikristályos szemcse felületén az előállítási technológia során zárórétegek alakulnak ki. Ez potenciálgátat képez a vezető elektronoknak. Ez a potenciálgát a Curie-pont alatt nem számottevő, az anyag kis ellenállású félvezetőként viselkedik. A Curie-pont felett azonban a potenciálgátak magassága rohamosan nőni kezd, így növekszik az ellenállása is. Ezzel egyidejűleg növekszik az anyag permittivitása is. A potenciálgát magasságát a külső elektromos tér csökkenti, varisztorhatás is fellép.
- Karakterisztikájukra a kis hőmérséklettartományon belüli nagy növekedés jellemző.
- A meredek szakasz kezdeti pontja ( $t_a$ ) a PTK termisztor jellemző pontja.



- A hőmérsékleti együttható közelítő számítása:

$$\alpha = \frac{\lg R_2 - \lg R_1}{T_2 - T_1} 100\%$$

- Kiviteli formájukat tekintve a termisztorok négy típusát különböztethetjük meg:
  - Gyöngytermisztorok (ebben a típusban gombostűfejnyi termisztormassza van, többnyire védő üvegcsőbe forrasztva)
  - Tárcsatermisztorok (különböző átmérőjű és vastagságú oxidpasztillák, amelyek kivezetéssel, védőburkolattal vagy fémszerelvénnyel kiegészítve készülnek)
  - Rúdtermisztorok (hossza és átmérője tág határok között változhat)
  - Morzsatermisztorok (ónozott kontaktus felületű forrasztókkal bevont apró hasáb formájú alkatrészek, a hibrid integrált áramkörök és SMD szerelésű készülékekhez készülnek)

## 6.2. Termoelemek

- A termoelemek működése az ún. termofeszültségen alapul.
- A termofeszültség, különböző fizikai hatások eredőjéből alakul ki. Ezek a hatások a Peltier-, a Thomson- és a Seebeck-féle.
  - A *Peltier-effektus*: Két különböző anyagú vezetőt végeiken összekötve, ha áram folyik rajtuk, akkor az egyik kötési pont melegszik, a másik hűl, illetve a fordított folyamatban a kötés pontok közül az egyik melegítése, vagy a másik hűtése a hurkon áramot hajt keresztül.

$$P_T = \pi I$$

- A *Thomson-effektus* esetében egyetlen vezető két pontja között fellépő hőmérsékletkülönbség hatására jön létre az energiaátalakulás.
- A *Seebeck-effektus* az a jelenség, amikor két különböző vezetőből álló áramkörben a vezetők csatlakozási pontjai közötti hőmérsékletkülönbséggel arányos termofeszültség keletkezik.

$$S = \frac{dU_T}{dT}$$

ahol S a Seebeck-tényező. A Peltier és a Seebeck tényezőkre a következő összefüggés igaz:

$$\pi = ST$$

Ezzel a termofeszültség:

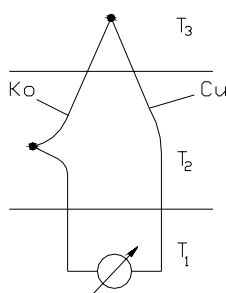
$$U_T = \int_{T_1}^{T_2} \pi dT$$

- A termoelem nem más, mint két egymással összeforrasztott huzal, amelyek forrasztási pontjában a hőmérséklettel arányos és a huzalok anyagától függő nagyságú termofeszültség keletkezik.

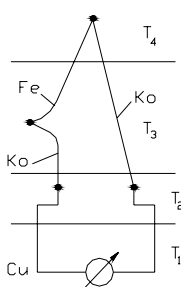
- A keletkező termofeszültségek előjelének egyértelmű meghatározására a platínát tekintjük alapfémnek.
- A termoelem érzékenysége annál nagyobb, minél távolabb helyezkedik el egymástól a két fém az elektrod-potenciál sorban.

| Anyag      | Termofeszültség [mV] | Anyag      | Termofeszültség [mV] |
|------------|----------------------|------------|----------------------|
| Konstantán | -3,47...-3,04        | Ólom       | +041..+0,46          |
| Kobalt     | -1,99..-1,52         | Magnézium  | +0,4..+0,43          |
| Nikkel     | -1,94..-1,20         | Alumínium  | +0,37..+0,41         |
| Kálium     | -0,94                | Wolfram    | +0,65..+0,9          |
| Nátrium    | -0,21                | Ezüst      | +0,67..+0,79         |
| Platina    | 0                    | Réz        | +0,72..+0,77         |
| Higany     | -0,07..+0,04         | Horgany    | +0,6..+0,79          |
| Garfít     | +0,22                | Manganin   | +0,57..+0,82         |
| Szén       | +0,25..+0,3          | Arany      | +0,56..+0,8          |
| Tantál     | +0,34..+0,511        | Vas        | +1,87..+1,89         |
| Ón         | +0,4..+0,44          | Nikkelkróm | +2,2                 |

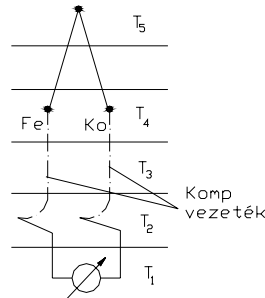
- Legelterjedtebb párosítások a Cu-Ko, a Fe-Ko, a NiCr-Ni, valamint a kromel-alumel.
- A vas-konstantán termoelemek  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  -  $+1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  hőmérséklet-tartományban használhatók. Érzékenységük  $0,00005\text{ V}/^{\circ}\text{C}$ .
- A réz-konstantán termoelem  $-200$  és  $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$  hőmérséklet-tartományban alkalmazható. Érzékenységük:  $0,00004\text{ V}/^{\circ}\text{C}$ .
- A könnyebb felismerhetőség céljából a termoelemeket egyezményes színjelzésekkel látják el. (A réz-konstantán termoelem színe barna, a vas-konstantáné kék, a nikkel-krómnikkelé zöld, a platina-platinaródiomé fehér.)
- A termoelemek csak nemagresszív és villamosan jól szigetelt környezetben helyezhetők el közvetlenül.
- A termoelemes hőmérsékletmérés a hidegpont hőmérsékletének állandó értéken való tartása alapvető fontosságú, mert a termofeszültség a hideg- és melegpont hőmérsékletkülönbségével arányos.
- A termoelemes hőmérsékletmérés hibaforrásai:
  - a hőelemhuzalok anyagösszetételének szórása,
  - a hőelem anyagának korróziója,
  - a kiegyenlítő vezeték korróziója,
  - a hidegponti hőmérséklet szórása,
  - a mérőköri mutató műszerek hibái,
  - a kompenzációs mérőkörnél, a kompenzáló-feszültség esetleges ingadozása.
- Termoelemes mérések:
  - Mérés két fémrel



- Mérés ismert hidegponttal

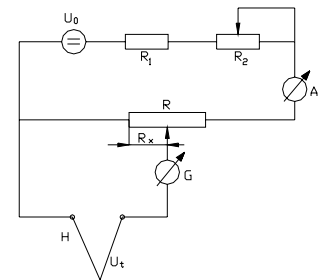


- Mérés kompenzáló-vezetékkel



- Az egyes termoelemek feszültsége meglehetősen kicsi, különösen kis hőmérséklet-különbségek esetén. Ezt erősítővel tudjuk megfelelően használni, azonban az erősítővel szemben stabilitás, zaj és meredekség szempontjából igen nagy igényeket kell támasztanunk. Ezt kissé mérsékelni lehet több termoelem sorba kapcsolásával (termo-oszlop).
- A termofeszültségek mérésére szolgáló mérőkörök vagy egyszerű feszültségmérő kapcsolások, vagy a feszültségkompenzáció elvén működő áramkörök (pl. Pogendorf-féle kompenzátor). Ha a galvanométer zérus áramot mutat:

$$U_t = U_0 \frac{R_x}{R}$$

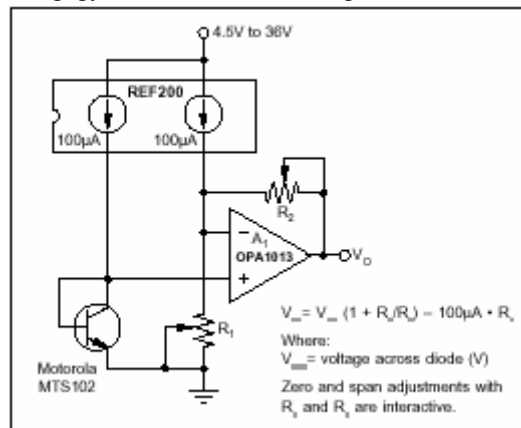


### 6.3. Hőmérsékletmérés diódával

- A diódák  $U_{AK}$  nyitófeszültsége egy meghatározott diódaáramnál hőmérsékletfüggő. Ezt a tulajdonságot alacsony precizitású területeken hőmérsékletmérésre fel lehet használni.
- A hőmérsékletfüggés közelítőleg állandó és a hőmérsékleti együttható viszonylag magas értékű:

$$\left. \frac{\partial U_{AK}}{\partial T} \right|_{i=\text{állandó}} \cong -2 \left[ \frac{mV}{K} \right]$$

- Pontosság:  $\pm 2^\circ C$
- Mérési tartomány:  $-40^\circ C - 150^\circ C$
- Gyakorlatilag minden dióda alkalmazható, de léteznek speciálisan kifejlesztett diódák is. (Pl.: Motorola MTS102)
- A dióda gerjesztésére a legjobb megoldás az áramgenerátoros gerjesztés.
- Diódás hőmérsékletméréshez továbbá nullpont-beállításra és erősítő áramkörre is szükség van.
- A fenti igényeket talán a legegyszerűbben az alábbi kapcsolással lehet kielégíteni:



Forrás: Burr-Brown: Diode Based Temperature Measurement

- A fenti kapcsolás átviteli függvénye:

$$V_O = V_{BE} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - 100 \mu A \cdot R_2$$

- Hibája, hogy az erősítés és a nullpont beállítása egymástól nem független.

| Típus                        | Érzékelési tartomány | Érzékenység   | Pontosság   | Linearitás   | Gyorsaság (kevergetett olajban)                                   | Méret   | Kivitelezés (hordozó)                   | Ár  | Megjegyzések  |
|------------------------------|----------------------|---|---|--|---|---|---|---|---|
| <b>Termoelem</b>             | -270°C - 1800°C      | Ált. kisebb, mint 50 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$                                     | $\pm 5^\circ\text{C}$ (refrenciaával)   | Széles tartományban gyenge, 100°C felett jobb  | Ált. 1s   | 0,01(gyöngy) - 0,5mm                                      | Fémgyöngy, sokféle szonda               | 1 - 50\$                                    | - Referenciát igényel.<br>- Alacsony kimeneti jelszint.<br>- Stabil jelkondicionálást igényel.                              |
| <b>Termisztor</b>            | -100°C - 450°C       | $\approx 5\%/^\circ\text{C}$ , (linearizált esetben: $\approx 0,5\%/^\circ\text{C}$ ) | Ált.: $\pm 0,1^\circ\text{C}$ a -40°C - 100°C tartományban, de a 0°C - 60°C tartományban létezik $\pm 0,001^\circ\text{C}$ -os is | $\pm 0,2^\circ\text{C}$ linearizált esetben, 100°C-os tartományban                           | Ált. 1-10s, de létezik 3-100ms is                                 | gyöngy: 0,1 mm, ált.: 1 - 3mm, lemez típ.: 0,025mm vastag | Üveg, epoxy, teflon, fémház, stb.       | normál: 2 - 10\$, precíziós: 10 - 350 \$    | - Legnagyobb érzékenység.<br>- 100°C felett speciális eszközöket igényel a hosszúidejű stabilitás érdekében                 |
| <b>Termorezisztor (Pt)</b>   | -250°C - 900°C       | $\approx 0,5\%/^\circ\text{C}$  | $\pm 0,1^\circ\text{C}$ általánosan elérhető, de létezik $\pm 0,01^\circ\text{C}$ -os precíziós eszköz                            | Széles tartományban közelítőleg lineáris, tipikusan 1°C-on belül marad 200°C-os tartományban | néhány másodperc  | 3 - 6mm   | Üveg, epoxy, kerámia, teflon, fém, stb. | 25 - 1000\$, az iparban leggyakoribb: 100\$ | - A hosszúidejű stabilitása kiváló.<br>- A termisztorokhoz képest nagyobb mérési tartomány, de alacsonyabb érzékenység      |
| <b>Diódák, tranzisztorok</b> | -270°C - 175°C       | -2,2 mV/°C  | $\pm 2^\circ\text{C}$ -tól $\pm 5^\circ\text{C}$ -ig terjed a -55°C és a 125°C közötti tartományban                               | 2°C-on belül van a teljes tartományban   | Ált. 1-10s. Kis dióda tokozás esetében azonban ms-os nagyságrendű | Normál dióda, vagy tranzisztor tok mérete                 | Üveg, fém                               | 0,5\$ alatt                                 | - Egyedi kalibrációt igényel.<br>- Az optimális működés érdekében áramgenerátorral kell meghajtani.<br>- Nagyon alacsony ár |
| <b>Integrált áramkörök</b>   | -85°C - 125°C        | Ált.: 0,4 %/°C  |   | 1°C-on belül van, tipikusan 0,2°C a 0°C - 70°C tartományban                                  | néhány másodperc  | TO-18, vagy miniDIP tokozás                               | Fém, műanyag                            | 1 - 10\$                                    | - Feszültség és áram kimenet egyránt elérhető   |

F  
Forrás: Linear Technology – Application Note 28 (Thermocouple Measurement) , 1998. február

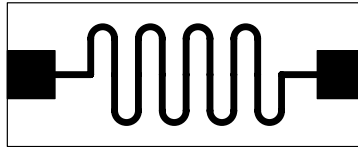
## 7. A fénymérés szenzorai

- Belső fényelektromos vezetítés: A nagy tisztaságú félvezető anyag vezetőképessége attól függ, hogy egy bizonyos idő alatt hány kristálykötés szakad fel. A félvezető elemeknél fénybesugárzás hatására a félvezető rétegből töltéshordozók szabadulnak fel, a réteg vezetőképessége megnő.
- Külső fényelektromos vezetítés: A fényvel besugárzott testből elektronok lépnek ki.

### 7.1. *A belső fényelektromos vezetésen alapuló érzékelők*

#### 7.1.1. Fényellenállások

- Belső fényelektromos jelenségen alapul a működésük. A beeső fotonok hatására növekszik a vezetőképességük.
- Kialakításuk: Egy szigetelő hordozón (legtöbbször üveg) helyezkedik el a fényérzékeny ellenállásréteg, amelyen (többnyire fémgőzöléssel) érintkező felületet alakítanak ki.
- Az ellenállás növelése érdekében legtöbbször meander-formájúak.

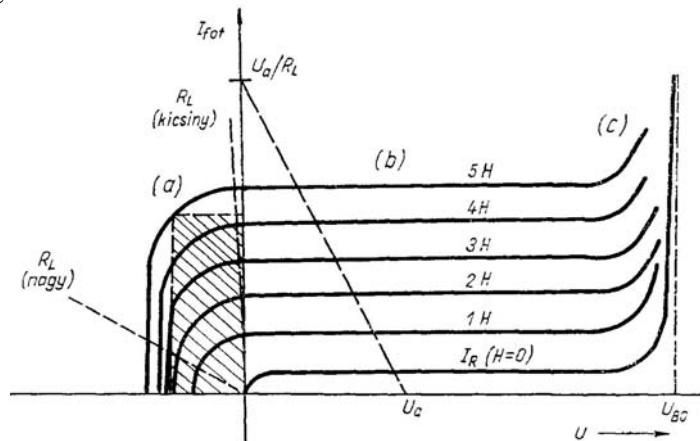


- Jelentős (nF) nagyságrendű saját kapacitással rendelkeznek (főleg a meander-kialakításúak), ez gátolja a közepes- és nagyfrekvenciás alkalmazásukat.
- Nagy hátránya a nagy tehetetlensége.
- Leggyakoribb anyagok:
  - Szelén (Se)
    - Széles hullámhossz-tartomány
    - fényvillamos jelleggörbéje nem lineáris
    - tehetetlensége meglehetősen nagy.
  - Kadmium-Szulfid (CdS)
    - Napjainkban ez a leggyakrabban alkalmazott alapanyag
    - Két változata létezik: a monokristályos, és a polikristályos
    - A monokristályos kadmium-szulfid spektrális jelleggörbéje meglehetősen szűk tartományban mutat érzékenységet. A polikristályos sokkal szélesebb tartományban.
    - A polikristályos fényellenállás spektrális érzékenysége jó fedésben van az emberi szem hullámhossz érzékenységgel.
    - Az átviteli jelleggörbéje a kezdeti szivárgási áramú és a végső telítési szakaszt kivéve lineáris.
    - Hátrányos tulajdonsága, hogy kis megvilágításnál elég nagy az időállandója, tehát néhány száz Hz-nél nagyobb frekvenciájú jellel már nem modulálhatóak.
  - Kadmium-Szelenid (CdSe)
    - Az infravörös tartományban mutatnak nagy érzékenységet
    - Meredekségük a kadmium-szulfid fényellenállásokénak mintegy 5...10-szerese.
    - Viszonylag nagy hőmérsékletfüggés
    - Az átviteli jelleggörbe nemlineáris
    - A tehetetlenségi időállandója kielégítő
  - Ólom-Szulfid
    - Főleg ipari alkalmazású fényellenállásokhoz alkalmazzák, mert gyors működésű.
    - Spektrális érzékenysége főként az infravörös tartományba esik.
    - Az ólom-szulfidnak van egy különleges tulajdonsága is, mégpedig, hogy a hőmérséklet érzékenysége nem csak az amplitúdóra vonatkozik, hanem a hullámhosszra is kihat, ezért pirotechnikai alkalmazásoknál termosztátba kell helyezni.
  - Ólom-Szelenid
    - Az infravörös tartomány legjobb tulajdonságú fényellenállás-érzékelője
    - főbb paraméteriben megegyezik az ólom-szulfiddal, de kitűnik nagyobb érzékenységgel és szobahőmérsékleten is használható.
    - Időállandója kicsi, jelleggörbéjének két maximuma van és nagy érzékenységet mutat az infravörös tartományban. Hűtéssel akár 8 $\mu$ m-es határhullámhosszt is el lehet érni.

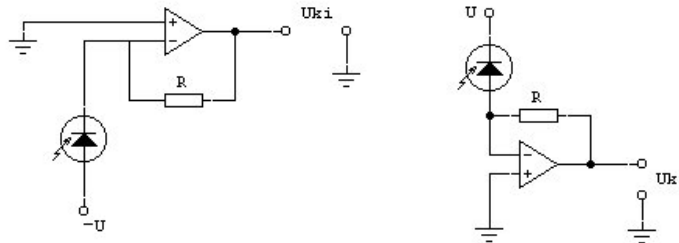


## 7.1.2. Fotodiódák

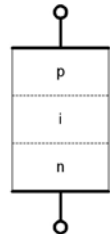
- Közöséges



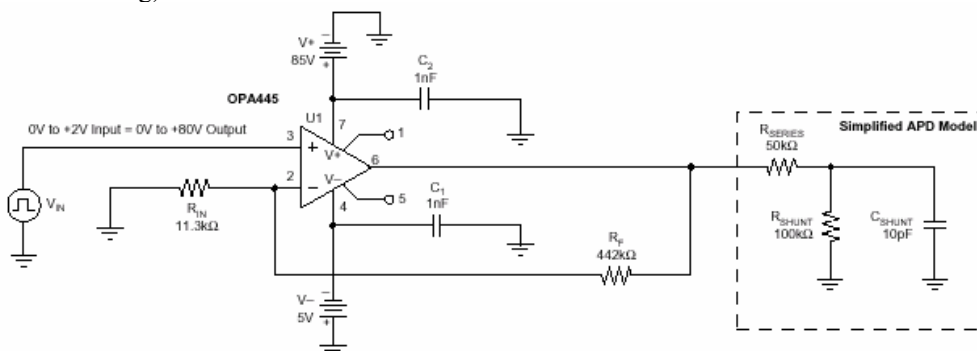
- A fénynek a  $p-n$  átmenetre kell esnie!
- Az  $n$ -réteg olyan vékony, hogy a fény át tud hatolni rajta!
- Nyitó irányú igénybevétel: Fényelem, Si esetében kb. 0,5 V-ot lehet levenni róla.
- Záró irányú igénybevétel: Fotodióda



- PIN
  - Intrinsic réteg (adalékolatlan, vagy nagyon gyengén  $n$  adalékolású)
  - Érzékenység nem változik
  - Kisebb a kapacitása, ezért gyorsabb működésű
  - Záróirányban működtetve még jobban csökken a kapacitása
  - Kisebb a zaja



- Lavina (Avalanche Photodiode)
  - Egyetlen belső erősítéssel rendelkező félvezető detektor
  - Záróirányú, letörési szakaszban használatos.
  - Hátrányai:
    - A dióda letörési szakasza egyedi: 100..200V
    - Ezt a feszültséget rendkívül pontosan kell tartani ( $10^{-3}$ ). Különben az áram jobban növekszik a feszültség hatására.
    - A fenti két igényt például az alábbi kapcsolás tudja kielégíteni (itt 80V az előfeszítő feszültség).



- Az erősítési faktor hőmérsékletfüggő is!
- Előnyei:
  - Gyors
  - Erősít
- PSD
- Képképző

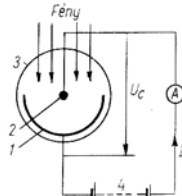
### 7.1.3. Fototranzisztor

- Érzékelési módjuk azonos a fotodiódákkal, azonban itt az érzékelést egy áramerősítés követi. A fototranzisztor tehát egy fotodióda-áramgenerátor és egy áramerősítő tranzisztor egybeépített változataként fogható fel, ezért nagy az érzékenyséjük.

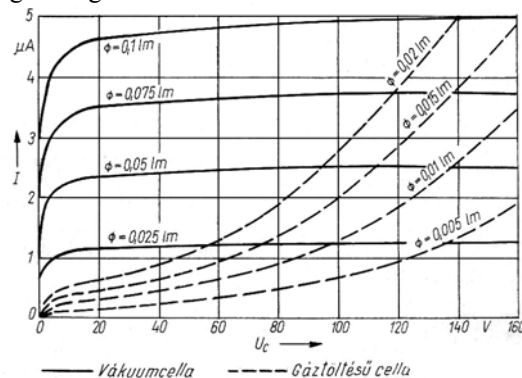
## 7.2. A külső fényelektromos vezetésen alapuló érzékelők

### 7.2.1. Fotocellák

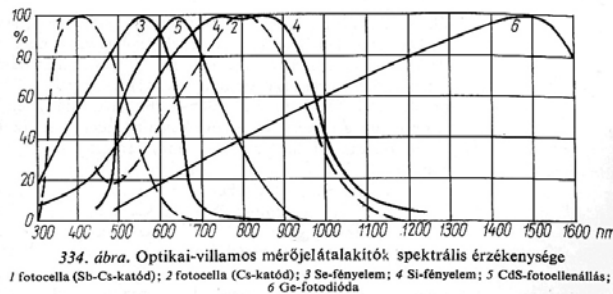
- A fotocella vákuum-, vagy gáztöltésű (Ar), többnyire hengeres alakú elem.
- Anódból és fotokatódból áll. A fotokatód alkálifém-tartalmú.



- A fotocellát  $U_c$  cella-előfeszítéssel működik. A katódból a fény hatására kilépő elektronok a ennek a feszültségnek a hatására mozognak az anód felé, fényvillamos áramot létrehozva. Ez az áramerősség arányos a cella megvilágítottságával.









- A gyakorlatilag elérhető fényvillamos áramok viszonylag kicsik, ugyanis a katódok terhelési árama korlátozott (kb.  $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  vákuumtöltésű, és  $0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  gáztöltésű fotocelláknál), ezért erősíteni kell.
- A fotocellák ún. sötétárama (a megvilágítatlan cellán átfolyó áramerősség) általában  $0,1 \mu\text{A}$  alatt van.
- A fotocellák spektrális érzékenysége a katód anyagával nagy mértékben befolyásolható.



## 7.2.2. Fotoelektron-sokszorozó

- A fotoelektron-sokszorozó olyan vákuum-fotocella, amelyben a szekunder elektronok sokszoros kiváltásával a fényvillamos áram jelentő, kb.  $10^6$ -szoros erősítését érjük el.
- Egyetlen foton becsapódása a dinódából több (kb. 1,5-szeres) szekunder elektront szabadít fel, miközben káros szabad ionok nem keletkeznek.
- Ez az egyetlen belső erősítéssel rendelkező elem.
- A szekunder emisszióhoz kb. 150V-os feszültség kell, így a működéséhez 1..2 kV-os stabil ( $10^{-3}$ -os pontossággal tartani kell!) előfeszítő feszültség szükséges.
- Az anód és a katódáram nem ugyanakkora! A munkaellenállást az anódra kell kötni.

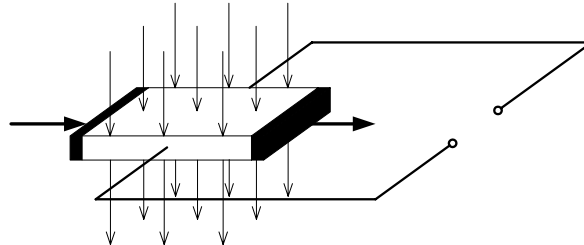
## 7.3. A fotoérzékelők összefoglaló táblázata

| Az átalakító:                       | vákuum fotocella  | fotoelektron-sokszorozó   | fényellenállás  | fényelem   | fotodióda   | foto tranzisztor  |
|-------------------------------------|---|---|---|--|---|---|
| A felhasznált hatás                 | Külső fényvillamos hatás  |   | belső fényvillamos hatás  | zárórétteg-hatás (a belső fényvillamos hatás különleges esete)                     |   |   |
| kapcsolás                           |  |  |  |  |  |  |
| üzemi feszültség                    | 100 V   | 1000...2000 V   | 10...100 V  | —  | 10 V  | 12 V  |
| hatásos felület                     | 1...7 cm <sup>2</sup>   | 3...100 cm <sup>2</sup>   | 0,1...3 cm <sup>2</sup>   | Se: 0,3...140 cm <sup>2</sup><br>Si: 0,5...30 cm <sup>2</sup>                      | 0,01 cm <sup>2</sup>  | 0,07 cm <sup>2</sup>  |
| fényérzékenység $T_p = 2850$ °K-nál | 20...50 μA/lm   | 10...100 A/lm   | 0,3...3 A/lm  | 0,25...1 mA/lm   | 30 mA/lm  | 130 mA/lm   |
| maximális spektrális érzékenység    | Sb-Cs-katód: 400 nm<br>Cs-katód: 800 nm   | 400...530 nm  | Cd S: 550...680 nm<br>Cd Se: 690...750 nm<br>Pb S: 2400 nm                        | Se: 560 nm<br>Si: 800 nm   | Ge: 1500 nm<br>Si: 800 nm   | Ge: 1400...1500 nm<br>Si: 800 nm  |
| hőmérsékleti tényező                | nagyon kicsi  | nagyon kicsi  | 2,5%/grd  | 0,2%/grd   | 0,5%/grd  | 5%/grd  |
| határfrekvencia                     | 10 <sup>9</sup> Hz  | 0,2 · 10 <sup>9</sup> Hz  | 5 Hz  | 500 Hz   | 50 · 10 <sup>9</sup> Hz   | 3 · 10 <sup>9</sup> Hz  |
| előnyök                             | nagy állandóság;<br>kis tehetetlenség   | nagy állandóság;<br>kis tehetetlenség;<br>nagy érzékenység                        | nagy érzékenység;<br>Cd S: a szem érzékenységéhez alkalmazható, olcsó             | aktív átalakító;<br>Se: a szem érzékenységéhez alkalmazható                        | kis tehetetlenség   | nagy érzékenység  |
| hátrányok                           | kis érzékenység   | nagy üzemi feszültség;<br>drága   | nagy hőmérséklet függés;<br>nagyfokú öregedés;<br>nagy tehetetlenség              | tehetetlenség  | nagy hőmérsékletfüggés, a sötét áramnál is; kedvezőtlen spektrális érzékenység      | nagy hőmérsékletfüggés, a sötét áramnál is; kedvezőtlen spektrális érzékenység      |

## 8. A mágneses tér érzékelői

### 8.1. Hall-elem

- Az effektust Hall, amerikai fedezte fel 1879-ben.
- Az effektus lényege: egy hasáb alakú vezetõn, vagy félvezetõn keresztül  $I$  áram folyik. Ha a vezetõt mágneses térbe tesszük (a mágneses tér erõvonalai metszik az áramsûrûsége-vektorokat), az árambevezetés felületére merõleges felületen villamos feszültség, ún. Hall feszültség ébred.



- A hatás a Lorentz-erõvel magyarázható, mivel a mágneses tér a  $v$  sebességgel mozgó elektronokra hatást gyakorol:

$$F_L = evB$$

- A Lorentz-erõ a hasábban hosszirányban mozgó töltéseket keresztirányban mozdítja el. Ez a lemez szélein polarizációt hoz létre, létrejön a Hall-feszültség. A Hall-feszültség irányát az dönti el, hogy a hasábban a vezetés  $n$ , vagy  $p$ -típusú.
- A Hall feszültség villamos erõtere szintén hatást gyakorol a töltéshordozókra, a Lorentz-erõ ellen hat.  $B$

$$F_L = F_H$$

$$F_H = eE_H$$

$$E_H = \frac{\partial U}{\partial l} = \frac{U}{l} = vB$$

$$U = v l B$$

- A vezetõ szabad töltéshordozóinak mozgási sebessége ( $v$ ):

$$v = \kappa E$$

- Az  $E$  villamos tér hozza létre a hosszirányú áramot. Így a differenciális Ohm-törvényt alkalmazva:

$$E = j\rho = \frac{I}{lh} \rho$$

$$U_H = \kappa\rho \frac{IB}{h}$$

- A  $\kappa\rho$  szorzatot Hall-állandónak nevezzük.

$$R_H = \kappa\rho, \left[ \frac{m^3}{As} \right]$$

$$U_H = R_H \frac{IB}{h}$$

- A Hall-állandó általános kifejezése, ha  $p$  és  $n$  típusú vezetés egyaránt előfordul:

$$R_H = \frac{A}{e} \frac{n\kappa_n - p\kappa_p}{(n\kappa_n + p\kappa_p)^2}$$

- $n$  és  $p$  a térfogategységben levõ szabad elektronok és lyukak száma,  $\kappa_n$  és  $\kappa_p$  ezek mozgékonyasága,  $e$  az elemi töltéshordozó töltése.  
 $A$  értéke fémeknél 1, félvezetõknél  $3\pi/8$ .
- Néhány anyag Hall-állandója:

### 8.2. Magnetorezisztor