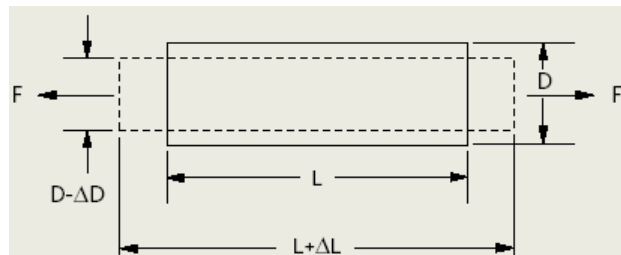


## Senzorji tlaka in sile

Sodobni senzorji za merjenje tlaka in sile najpogostje uporabljajo princip merjenja spremembe električne upornosti zaradi spremembe raztezka merilnega elementa pod vplivom mehanske obremenitve. Zaradi specifične oblike govorimo o uporovnih merilnih lističih, ki jih glede na osnovni material delimo na:

- kovinske (folijske in tankoplastne),
- polprevodniške in
- keramične.

Pri njih izkoriščamo t.i. piezouporovni efekt<sup>1</sup>, zaradi katerega se prevodnemu telesu npr. kovinski palici dolžine  $l$  in preseka  $S$  pod vplivom mehanske obremenitve (nateg, tlak) spremenijo dimenzije  $\Delta l$  in  $\Delta S$ .



Slika:

Posledično se palici z upornostjo

$$R = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{l}{a \cdot b}$$

spremeni električna upornost za

$$dR = \frac{l}{a \cdot b} d\rho + \frac{\rho}{a \cdot b} dl - \frac{\rho \cdot l}{a \cdot b^2} db - \frac{\rho \cdot l}{a^2 \cdot b} da .$$

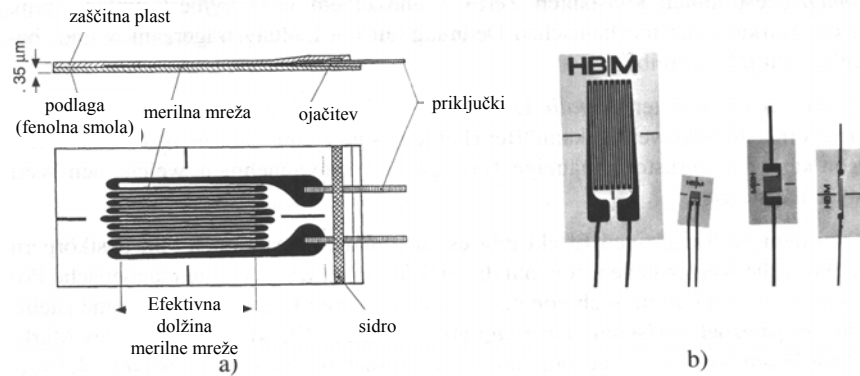
Njena relativna sprememba je enaka

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{db}{b} - \frac{da}{a} .$$

Raztezki ter skrčki telesa morajo biti elastični ter reverzibilni. Plastični deformaciji takšnega senzorja se moramo izogibati.

Uporovni merilni lističi za merjenje tlaka in sile so pogosto izdelani iz tankih kovinskih vezi, ki so pogosto meandrasto zazankane. Te uporovne zanke so nanešene na osnovni material, ki je plastična folija (metalfolijski senzorji) ali pogosteje polprevodnik ali keramika.

<sup>1</sup>Izkoriščamo tudi druge spremembe, ki nastopijo zaradi spremembe dimenzij telesa; sprememba dielektričnosti (piezoelektrični efekt) ali sprememba magnetne polarizacije (magnetoelastični efekt). Slednja dva efekta omogočata sicer gradnjo senzorjev z zelo veliko občutljivostjo, a so ti senzorji namenjeni pretežno merjenju oz. zaznavanju dinamičnega tlaka oz. sil. Omenjena omejitev ne velja za piezouporovne senzorje, ki omogočajo merjenje statičnih veličin.



Slika:4.1.2-1

Temperaturna odvisnost električne upornosti  $TK_R$  in modula elastičnosti  $TK_E$  osnovnega materiala sta glavni vplivni veličini, ki imata izrazit vpliv na uporabno temperaturno območje takšnega senzorja.

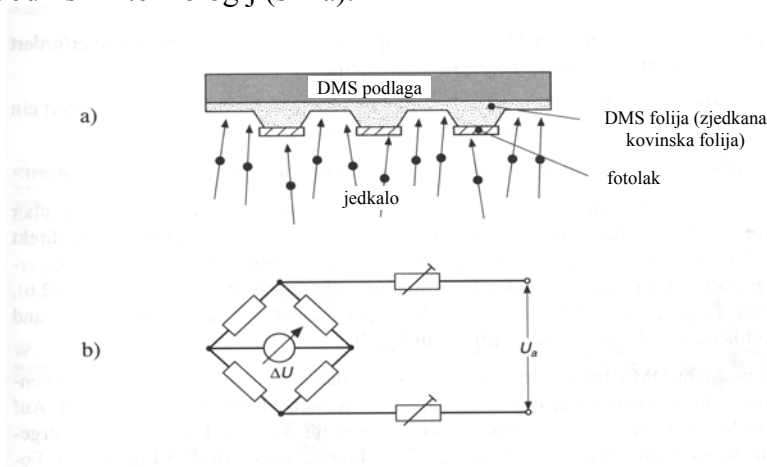
Metalfolijske senzorje zaradi majhne mehanske trdnosti redko uporabljamo samostojno. Pogosteje jih pritrdimo (prilepimo) na masivnejša telesa prek katerih se nato mehanske obremenitve prenašajo na senzor. Lepila morajo zato čim verodostojnejše prenašati mehanske raztezke s površine masivnih teles na senzor.

- Uporaba lepil ter nizka temperaturna obstojnost plastičnih folij omejujeta uporabo tovrstnih senzorjev do cca. 120°C.
- Dosegajo veliko točnost ( $10^{-6}$ ).

Iz merilnotehničnih razlogov želimo, da senzorji izpolnjujejo nekaj osnovnih zahtev:

- upornost merilnih lističev mora ležati v  $k\Omega$  območju,
- miniaturizacija (povezano z uporabo litografskih postopkov),
- uporaba lepil odpove pri zelo tankih merilnih lističih, saj je razteznost takšnega sklopa odvisna pretežno od lastnosti lepila.

Omenjene zahteve zlahka dosežemo z uporabo tankoslojnih senzorjev, ki so izdelani z uporabo polprevodniških tehnologij (slika).

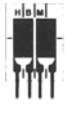


Slika: 4.1.2-4

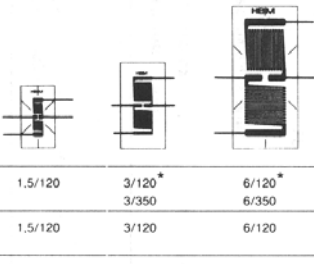
Uporabi se električno neprevodna osnova, ki je na eni strani metalizirana s plastjo kovine. Ta kovina se nato s postopkom litografije na nezaščiteneh mestih zjedka. Edina slabost teh senzorjev so zelo visoki stroški izdelave.

### mit 2 Meßgittern

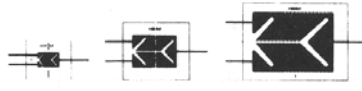
Doppel-DMS



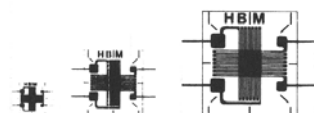
<b>DY 11</b> für Stahl	6/350	
---------------------------	-------	--

<b>XY 11</b> für Stahl	1.5/120	3/120*	6/120*
		3/350	6/350
<b>XY 13</b> für Aluminium	1.5/120	3/120	6/120

<b>XY 21</b> für Stahl	1.5/120	3/120	6/120*
			6/350

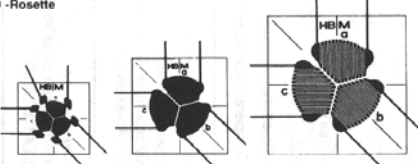
  


<b>XY 91</b> für Stahl	3/120	6/120	10/120
<b>XY 93</b> für Aluminium	3/120	6/120	10/120

### mit 3 Meßgittern

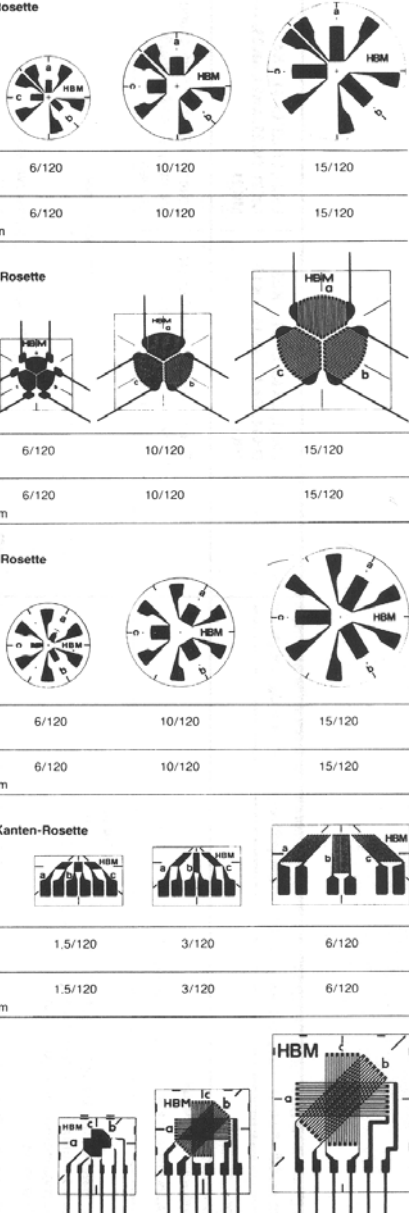
0 /45 /90 -Rosette



<b>RY 11</b> für Stahl	6/120*	10/120	15/120
<b>RY 13</b> für Aluminium	6/120	10/120	15/120

### mit 3 Meßgittern

0 /45 /90 -Rosette



<b>RY 31</b> für Stahl	6/120	10/120	15/120
<b>RY 33</b> für Aluminium	6/120	10/120	15/120

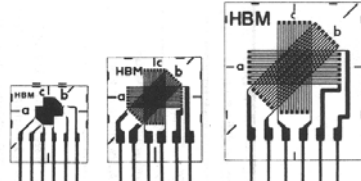
<b>RY 41</b> für Stahl	6/120	10/120	15/120
<b>RY 43</b> für Aluminium	6/120	10/120	15/120

<b>RY 71</b> für Stahl	6/120	10/120	15/120
<b>RY 73</b> für Aluminium	6/120	10/120	15/120

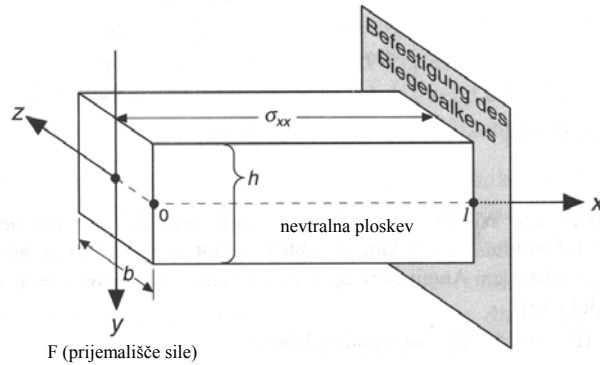
<b>RY 81</b> für Stahl	1.5/120	3/120	6/120
<b>RY 83</b> für Aluminium	1.5/120	3/120	6/120

<b>RY 91</b> für Stahl	3/120	6/120	10/120
<b>RY 93</b> für Aluminium	3/120	6/120	10/120

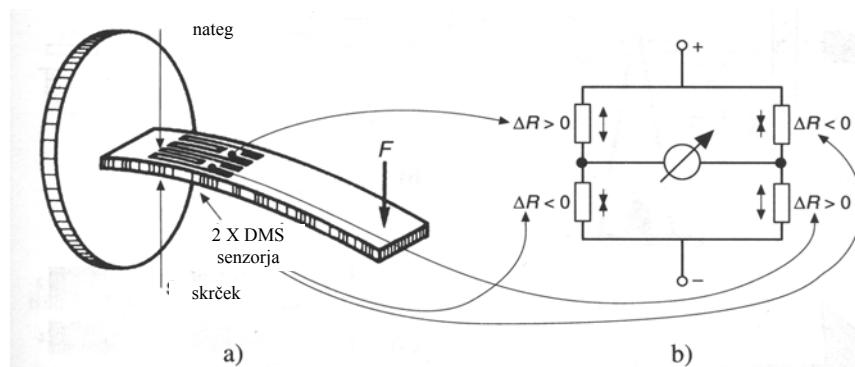
Za merjenje zelo velikih sil in tlaka uporabljamo mehanske sisteme (vzmeti) prek katerih se mehanske obremenitve prenašajo na vzmeti pritrjene senzorje.

Najenostavnejša vzmet je palica, ki ima en konec togo vpet v podlago. Če na prosti konec deluje sila  $F$ , se v vsaki točki palice pojavi površinska napetost. Največja je na togo vpetem mestu in sicer na obeh skrajnih točkah  $y = \pm h/2$ .



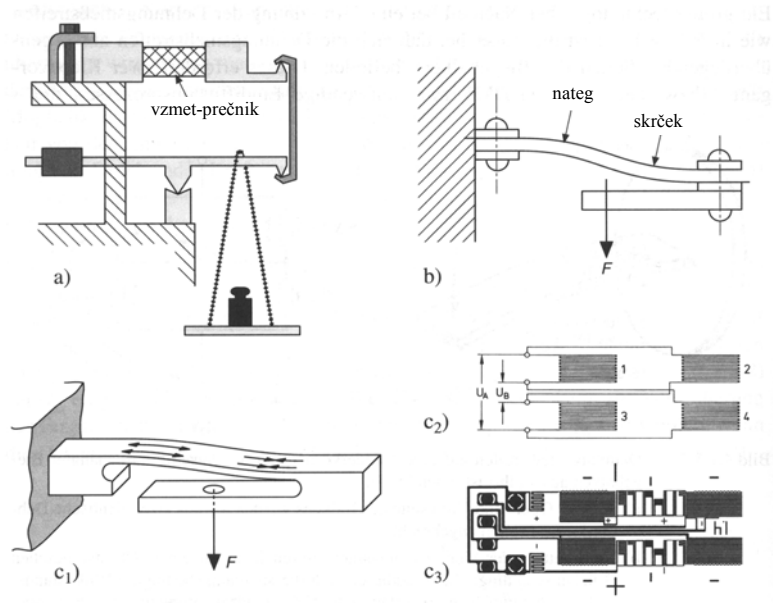
Slika: 4.1.5-1

Da dosežemo čim večjo občutljivost, pritrđimo senzor tako na mesto skrčevanja kot mesto raztezanja vzmeti.



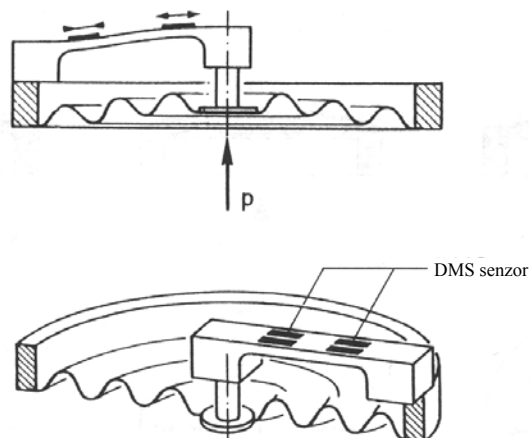
Slika:4.1.5-2: montaža štirih uporovnih merilnih lističev, ki tvorijo Wheatstonov merilni mostič.

Takšna pritrđitev zagotavlja minimalno temperaturno odvisnost napetosti diagonale zaradi enakih temperaturnih koeficientov vseh štirih uporovnih lističev.



Slika: 4.1.5-4: ostale oblike vzmeti za montažo uporovnih merilnih lističev

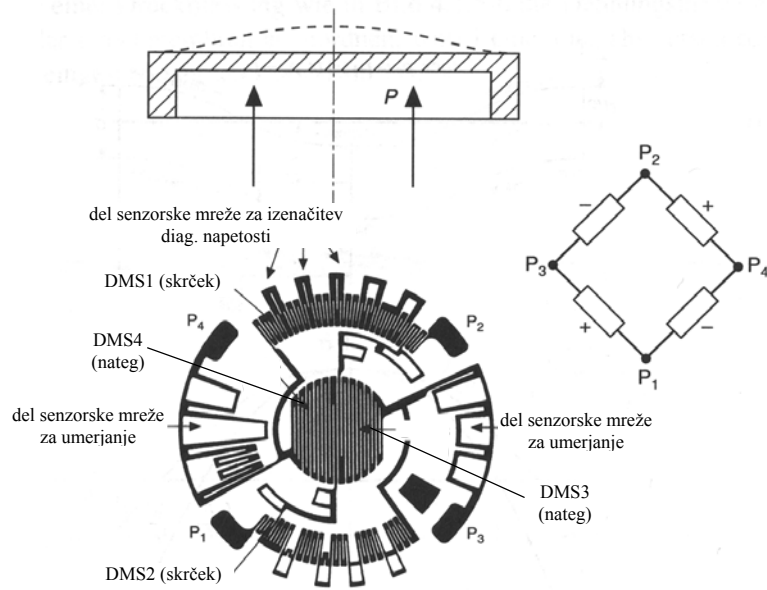
S podobnimi mehanskimi prijemi lahko merimo tudi zelo velike tlake. V ta namen uporabljamo kovinske membrane prek katerih se sila povzročena s tlakom  $p$  prenese na vzmet, od tam pa na uporovni merilni listič



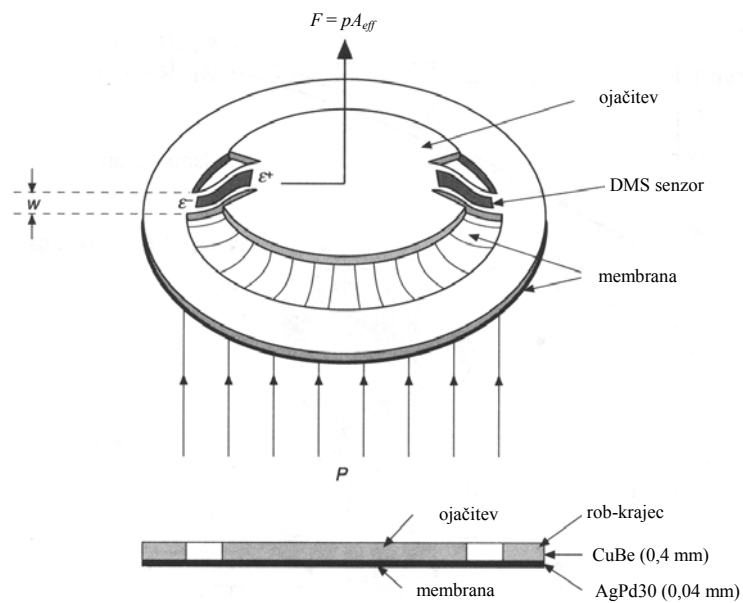
Slika: 4.1.5-6: merjenje velikih tlakov z uporovnimi merilnimi lističi

Mesto pritrditve uporovnih senzorjev je odvisno od oblike kovinskih membran.





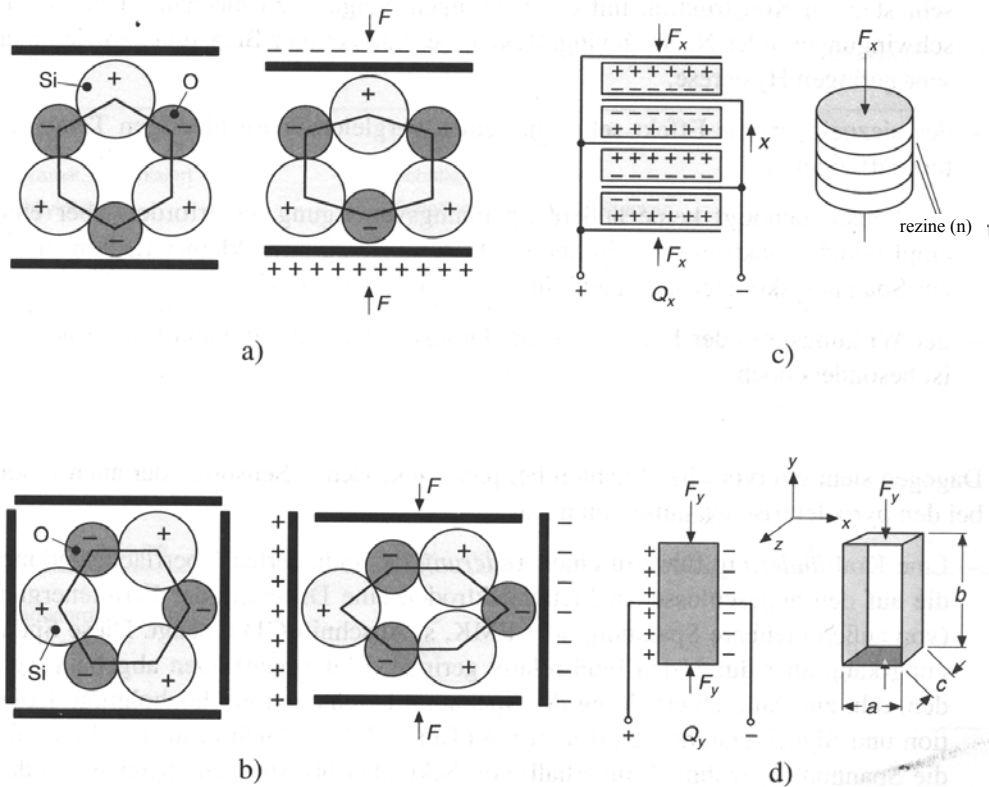
Slika:4.1.5-10a



Slika:4.1.5-12: namestitvev senzorjev na obročno kovinsko membrano

## Piezoelektrični senzorji tlaka

Piezoelektrika je pojav, pri katerem se na mejnih ploskavah nekaterih kristalov pojavljajta električna naboja z različnima predznakoma, če obremenimo kristal v določeni smeri s tlakom, z nategom ali torzijo. Pri tem piezoelektričnem pojavu se kristal električno polarizira, pri čemer je polarizacija vzporedna ali pravokotna na smer delujoče obremenitve.



Slika: 4.2.2-1

Obratni pojav, ko se zaradi nanesenega električnega naboja na mejne ploskve kristala spremenijo njegove dimenzije, imenujemo elektrostrikcija.

Med mehanično obremenitvijo in električno polarizacijo (nabojem) je premera sorazmernost. Če se kristal zaradi zunanje obremenitve deformira, se ioni, ki sestavljajo kristalno mrežo, premaknejo in s tem se premakne tudi težišče nabojev. Na mejnih ploskavah kristala se tvori električni naboji. Kristali z izrazitimi piezoelektričnimi lastnostmi so kremen, turmalin in snovi kot Seignettova sol (kalijevo-natrijev tartrat) in barijev titanat.

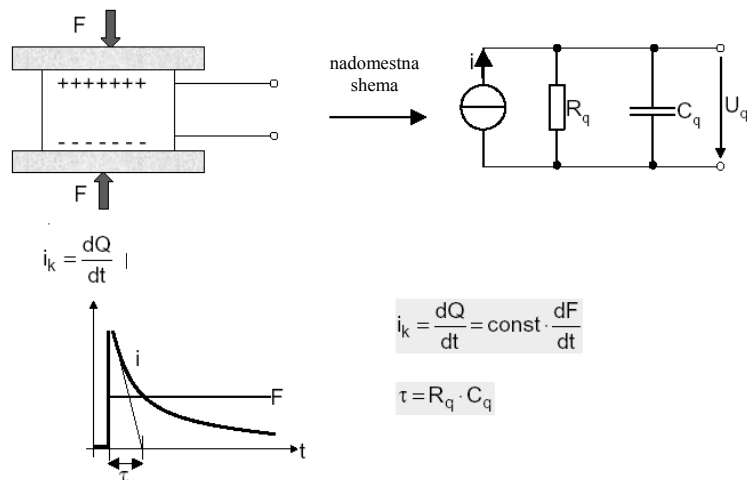
Piezoelektrični senzorji tlaka imajo glede na ostale več prednosti:

- enostavna zgradba, ki zahteva zelo malo dodatnih komponent (zgolj kovinska folija za odvzem električnega naboja),
- imajo majhno temperaturno odvisnost,
- ne potrebuje zunanje napetosti (vendar potrebuje občutljivo merilno pripravo za zajem električnega naboja-precizijski ojačevalnik s kompenzacijo offsetne napetosti),
- energijski izkoristek pri pretvorbi mehanične v električno energijo je prav tako zelo velik.

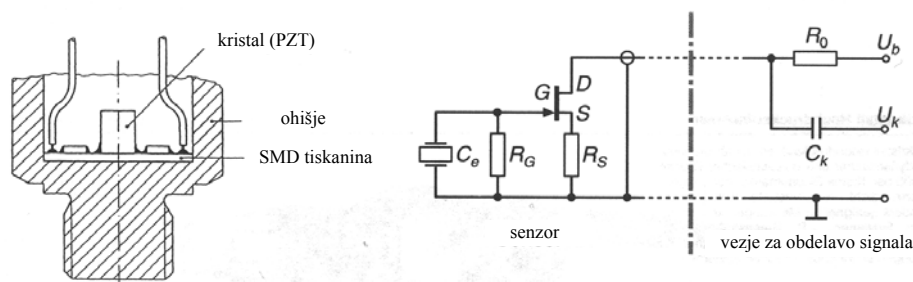
Slabost:



- namenjeni so le merjenju sprememb sile ne pa njenemu statičnemu iznosu. Razlog temu je, da se pri spremembi mehanične obremenitve na mejnih ploskvah pojavi električni naboj, ki pa zaradi končno velike upornosti merilne priprave odteče z obeh mejnih ploskev.



Zato se piezoelektrični senzorji najpogosteje uporabljajo kot senzorji pospeška. Tipično izvedbo takšnega senzorja kaže spodnja slika



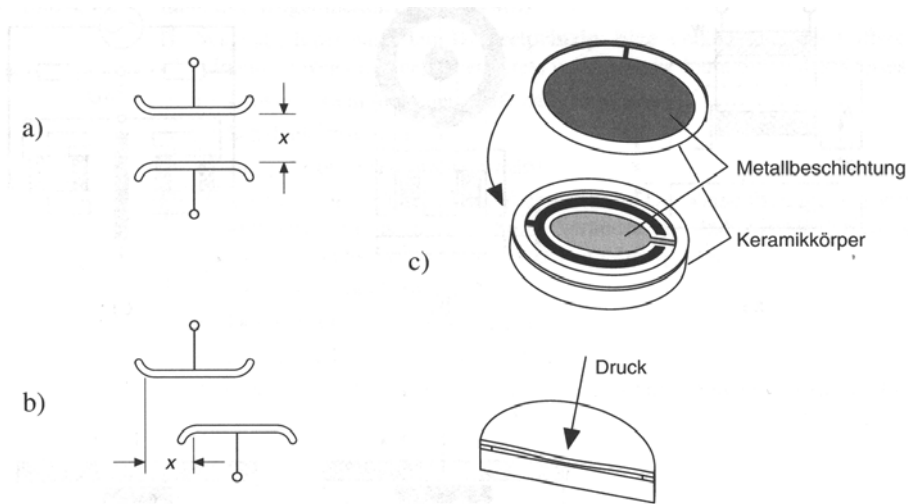
Slika:4.2.2.-4

Z induciranim nabojem na mejnih ploskvah senzorja krmilimo nizkonapetostni MOSFET tranzistor, ki je vezan kot napetostni ojačevalnik. Odvzem ojačenega signala je predviden preko veznega kondenzatorja  $C_K$ .

Piezoelektriki je zelo sorodna piroelektrika. Pojavlja se pri vseh piezoelektričnih kristalih, ki imajo že brez zunanjega vpliva trajen dipolski moment, torej so polarizirani. Piroelektrični so kristali, pri katerih se mejne ploskve naelektrijo, če jih močno ohladimo ali segrejemo.

### Induktivni in kapacitivni senzorji tlaka in sile

Reverzibilne spremembe raznih mehanskih struktur lahko zaznamo posredno prek merjenja spremembe kapacitivnosti, ki je rezultat spremenjenih geometričnih dimenzij, ali preko merjenja induktivnosti, kjer ponavadi spreminjamo lego permeabilnega materiala, ki je potopljen v mirujočo tuljavo (ali obratno).

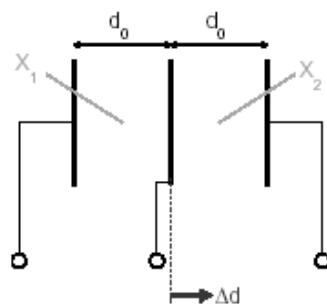


Slika: Kapacitivni senzor tlaka oziroma sile 4.3-1

Kapacitivne membrane so najpogosteje izdelane s polprevodniškimi tehnologijami, ki omogočajo izdelavo zelo majhnih in občutljivih kapacitivnih senzorjev. Slabosti sta predvsem:

- merjenje kapacitivnosti je zahtevnejše od merjenja upornosti,
- sprememba kapacitivnosti zaradi spremembe mehanskega raztezka je praviloma nelinearna.

### 5.3 Differential-Kondensator



**Anwendung:**

- Weg-Messung
- Winkel-Messung
- Kondensatormikrophon

**Verschiebung um  $\Delta d$ :**

$$X_1 = -\frac{1}{\omega C_1} = -\frac{d_0 + \Delta d}{\omega \epsilon_0 \epsilon_r A}$$

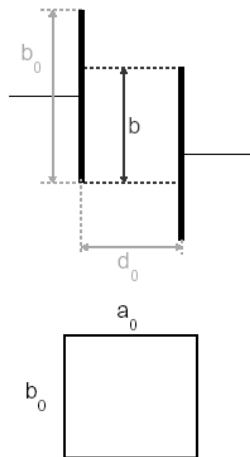
$$X_2 = -\frac{1}{\omega C_2} = -\frac{d_0 - \Delta d}{\omega \epsilon_0 \epsilon_r A}$$

**Halbrücke:**

$$\underline{U}_{ab} = \frac{U_0}{2} \frac{X_2 - X_1}{X_2 + X_1} = \frac{U_0}{2} \frac{2\Delta d}{-2d_0}$$

$$\underline{U}_{ab} = -\frac{U_0}{2d_0} \cdot \Delta d$$

### 5.3 Variation der Plattenfläche



Max. Kapazität:

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \cdot a_0 \cdot b_0}{d_0}$$

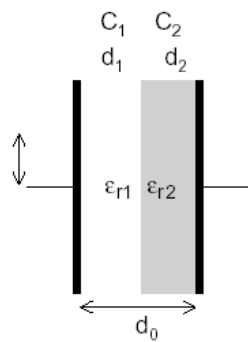
Verschiebung:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot a_0 \cdot b}{d_0} = \frac{C_0}{b_0} \cdot b \sim b$$

Anwendung:

Drehkondensator / Winkelmessung

### 5.3 Variation des Dielektrikums I



Serienschaltung  $C_1, C_2$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad \text{mit } \epsilon_{r1} = 1:$$

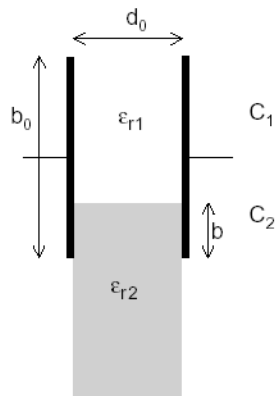
↓

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{\epsilon_0 A} \left( \frac{d_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\epsilon_{r2}} \right)$$

$$A \quad C = \frac{\epsilon_0 A}{d_0 - d_2 + \frac{d_2}{\epsilon_{r2}}} = \frac{\epsilon_0 A}{d_0 \left( 1 - \frac{1}{\epsilon_{r2}} \right) \textcircled{d_2}} \quad \text{Messgröße}$$

Anwendung: Schichtdickenmessung

## 5.3 Variation des Dielektrikums II



Anwendung: Niveau / Füllstand

Parallelschaltung  $C_1, C_2$ :

$$C = C_1 + C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r1} \cdot a_0 \cdot (b_0 - b)}{d_0} + \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r2} \cdot a_0 \cdot b}{d_0}$$

Sei  $\epsilon_{r1} = 1$

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot a_0}{d_0} (b_0 - b + \epsilon_{r2} b)$$

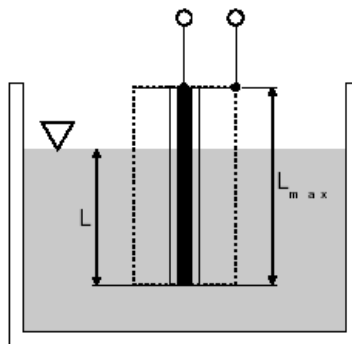
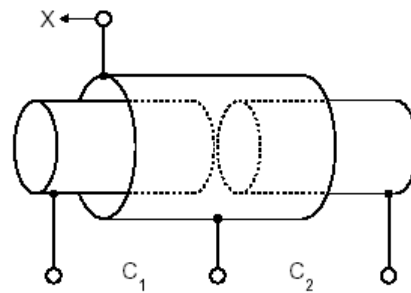
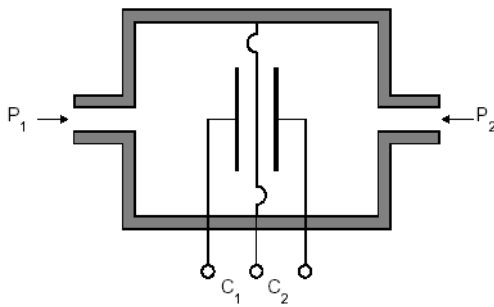
$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \cdot a_0 \cdot b_0}{d_0}$$

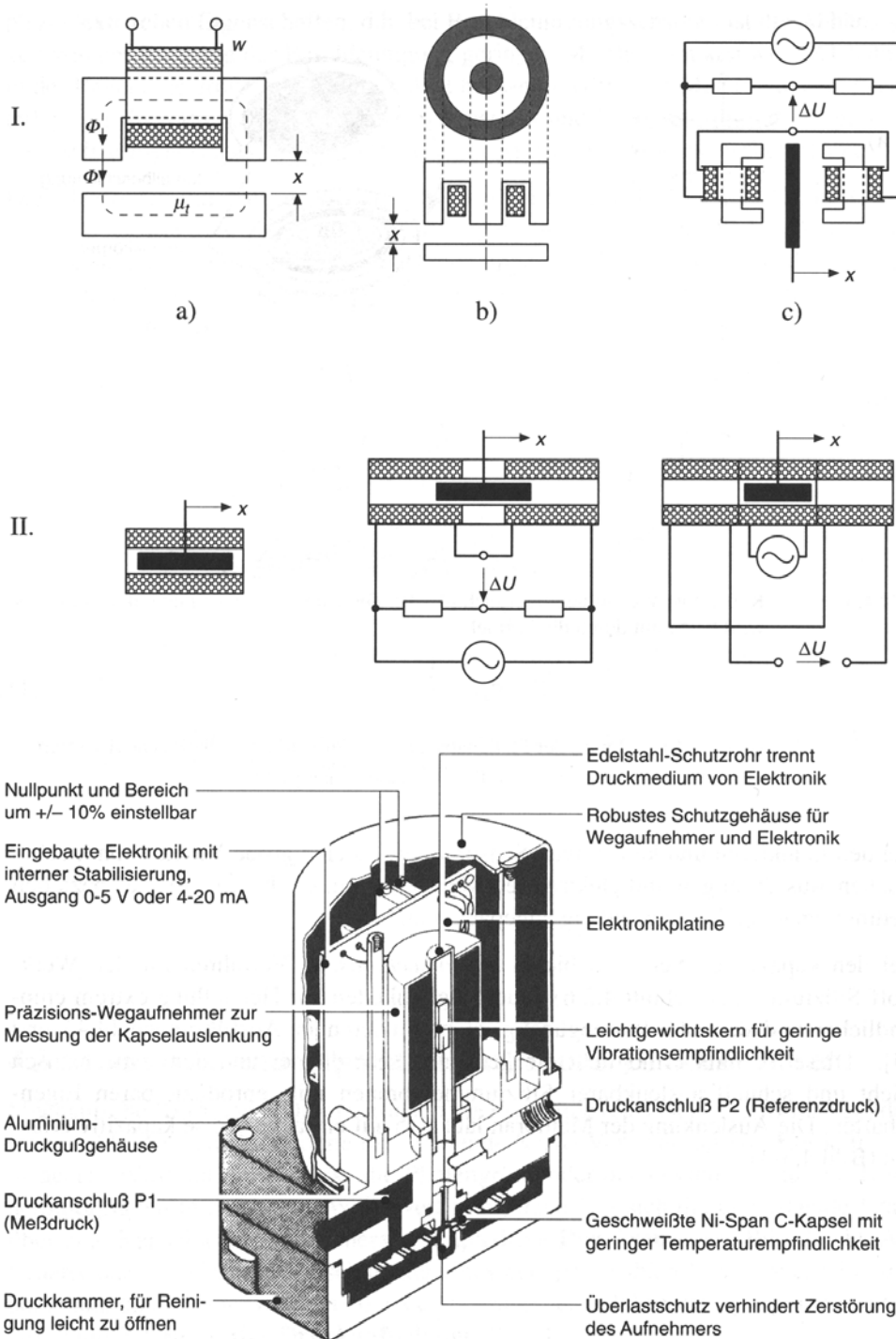
rel. Änderung:

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{C - C_0}{C_0} = \frac{b_0 - b}{b_0} + \frac{\epsilon_{r2} \cdot b}{b_0} - 1$$

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\epsilon_{r2} - 1}{b_0} \cdot b \propto b$$

### Uporaba kapacitivnih senzorjev



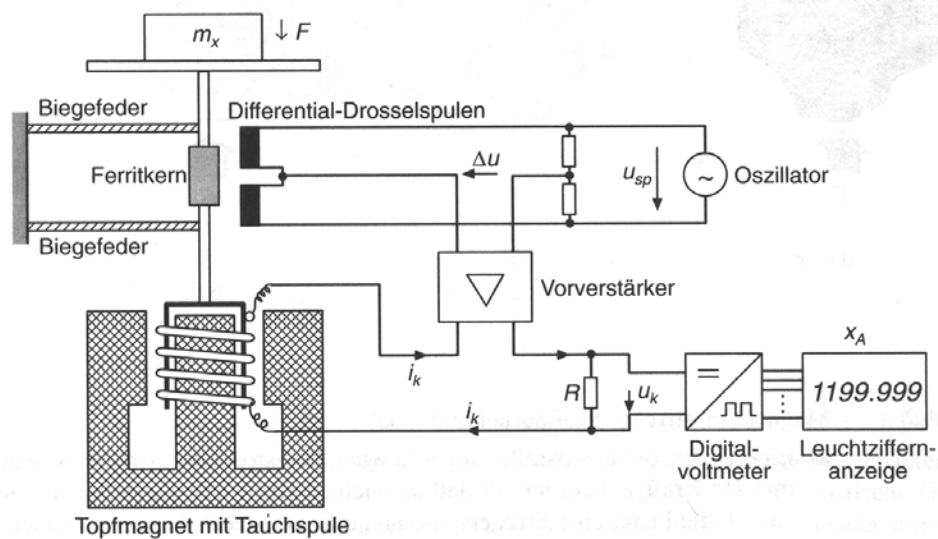


Slika: Induktivni senzor tlaka

### Ostali merilni postopki za merjenje tlaka in sile

**Elektrodinamični kompenzacijski postopek** je osnovan na kompenzaciji sile (mase) merjenega objekta z elektromagnetno protisilo elektromagneta. Osrednji del merilne priprave je induktivni diferencialni merilnik pozicije, ki ob mehanski obremenitvi vage zazna izmik feritnega jedra. Pojavi se napetostna razlika, ki jo ojačevalnik (regulator) ojači. Tok skozi

potopno dušilko se zato poveča, zaradi česar se tuljava pomakne nazaj v ravnovesno lego (na sredino pola elektromagneta). Po prehodnem pojavu, ko se potopna tuljava ustali v sredinski legi, je tok skozi njo sorazmeren merjeni masi objekta.



Slika: 4.4.-1

Opisani postopek je najpogosteje uporabljen v precizijskih vagah in omogoča merjenje mase v širokem merilnem obsegu od nekaj mg do nekaj kg z merilno točnostjo, ki zlahka dosega vrednost  $10^{-6}$ .