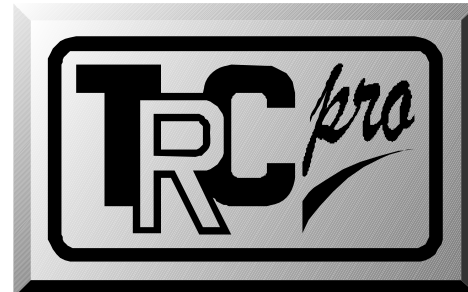
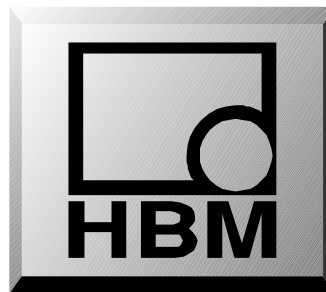


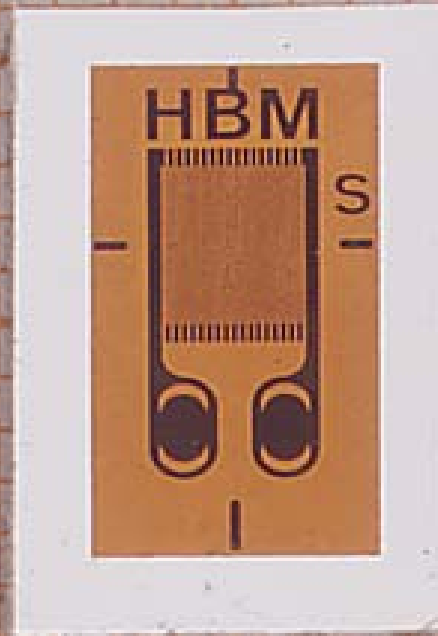
MERENJE MEHANIČKIH VELIČINA

- PRIMENA MERNIH TRAKA -



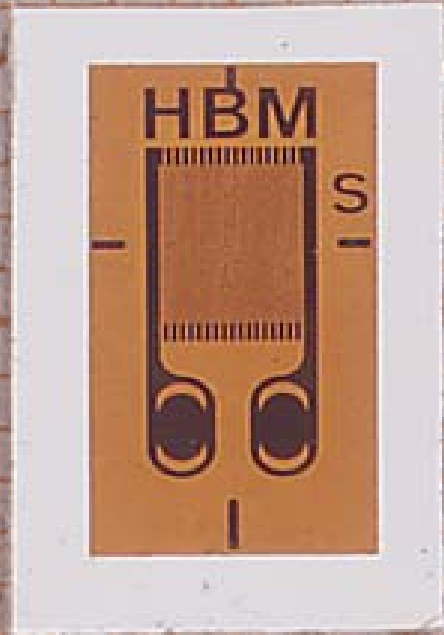
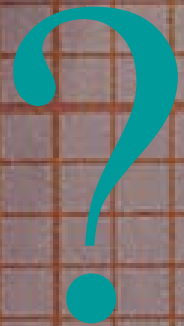
- Istorijski razvoj
- Primena mernih traka
- Veza napona i deformacije
- Fizikalni princip rada merne trake
- Kriterijumi za selekciju mernih traka
- Tehničke karakteristike mernih traka
- Postavljanje merne trake na objekat ispitivanja
- Wheatston-ov most
- Elementarni slučajevi opterećenja
- Eliminacija grešaka merenja
- Specijalni slučajevi opterećenja
- Davači na principu mernih traka
- Kalibracija mernih uređaja
- Merna pojačala, softvare za merenje i analizu, CATMAN

60-ti RODJENDAN

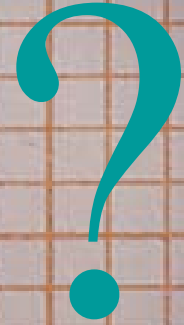
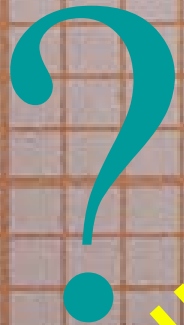


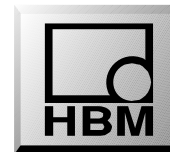
Merne trake

Zastarelo ??



prevazidjeno ??

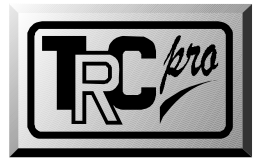
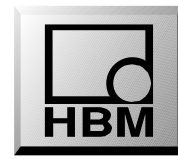




ISTORIJSKI RAZVOJ

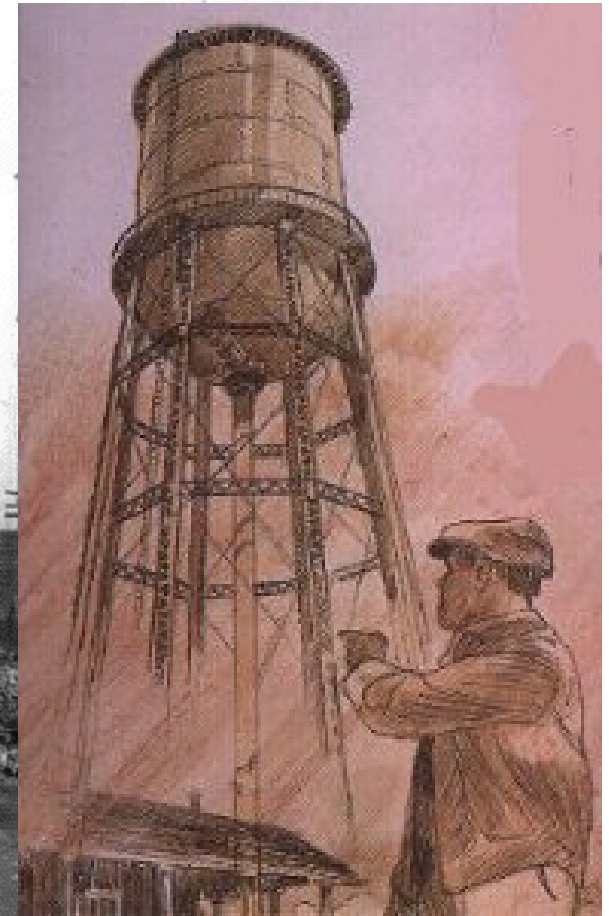
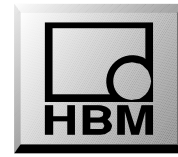
Primena mernih traka

Istorija

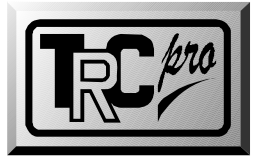
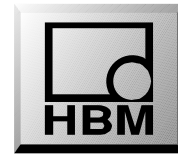


- **1856:** Lord William Thompson opisuje efekat proporcionalne promene Ohm-ovog otpora kod bakarnih provodnika pri izduženju (bez praktične primene)
- **1938:** **E.E. Simons**, Kalifornija, USA i **A.C. Ruge**, MIT, USA nezavisno otkrivaju mernu traku
- **1941:** Formirana firma Baldwin-Southwark Co., USA, za industrijsku proizvodnju žičanih mernih traka
- **1952:** Proizvodnja mernih traka kod HBM, Darmstadt
- **1963:** Proizvodnja folijskih mernih traka u HBM, DA

San Francisco 1909



Rouge-ov Sensor dilatacija

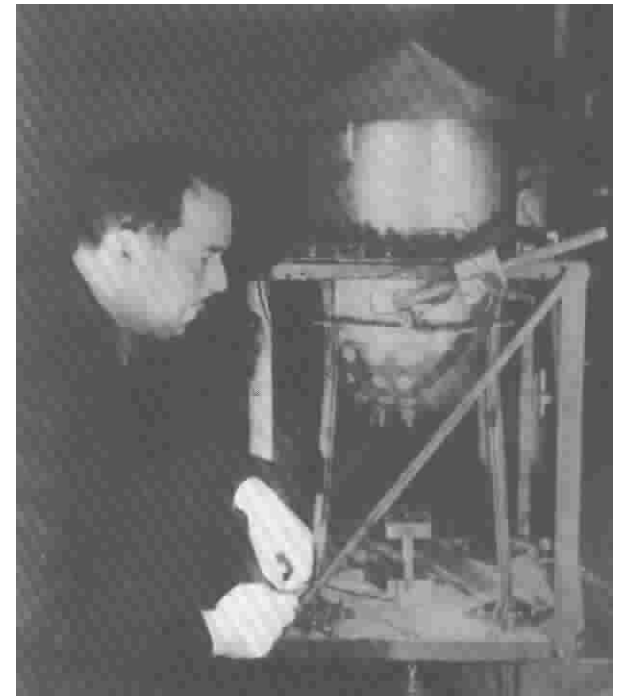


Problem 1:

- Kako konstruisati toranj za vodu, otporan na zemljotres?

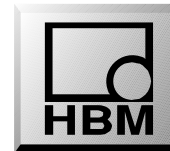
Problem 2:

- Kako meriti dinamička naprezanja na platformi tornja koja vibrira?



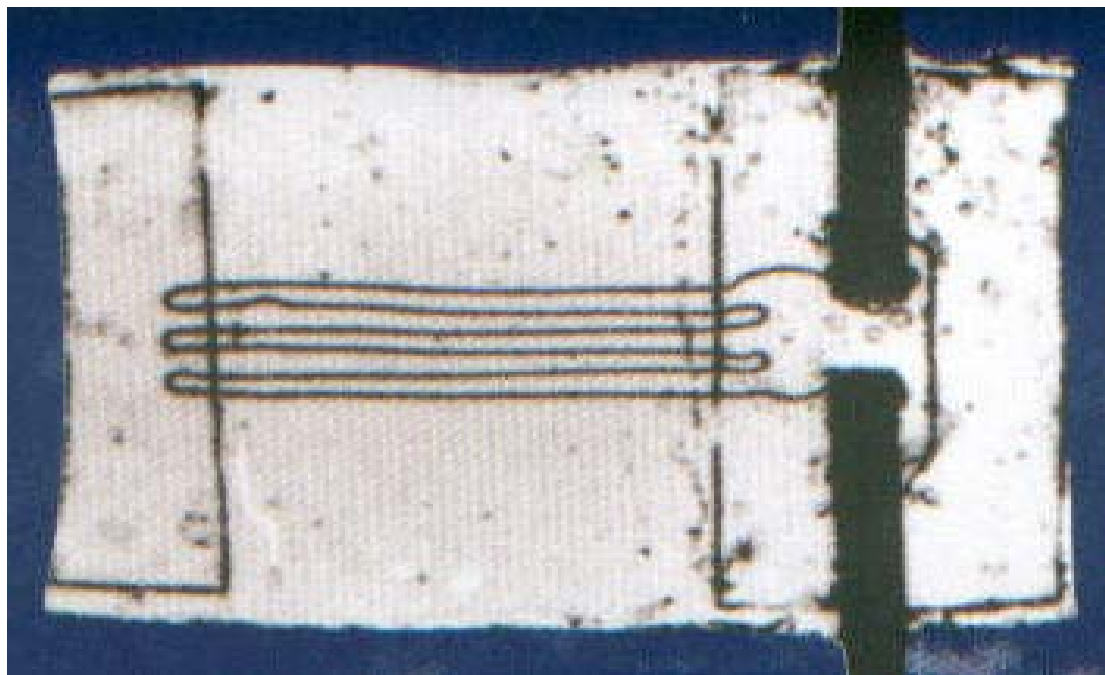
Arthur Claude Rouge

Rouge-ov senzor dilatacija

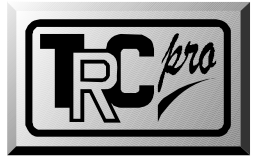
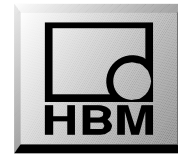


Upotrebio je veoma tanku zicu, zaleopio je u obliku meandra na komad papira i sve to zalepio na model koji je ispitivao

**To je bila prva
zičana merna
traka**



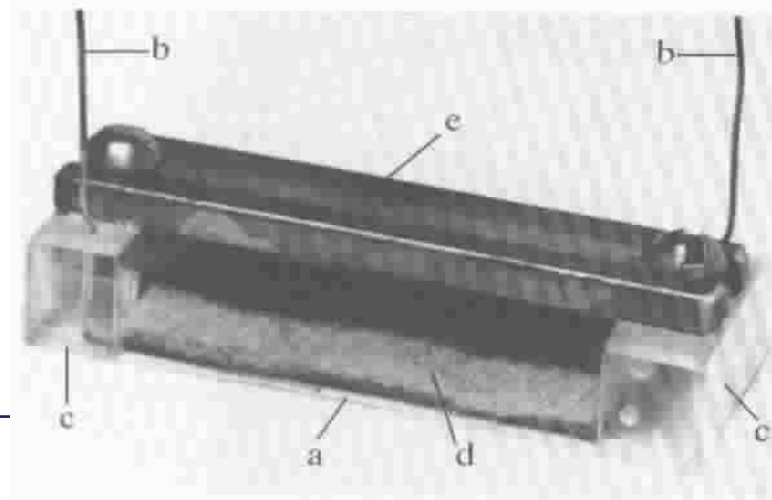
Rouge-ov senzor dilatacija



- Uspeo je u razvoju novog tornja za vodu
- Ponudio je završen senzor patentnom komitetu MIT-a radi prihvatanja
- MIT je procenio: ***“we can see no commercial value in this device”!***

Karl Hottinger radio je u to vreme na teoriji i konstrukciji pretvrača sa Prof. Rouge-om

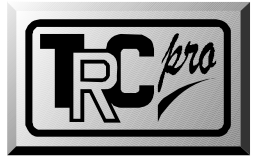
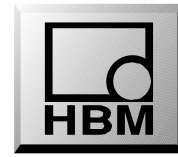
Rouge-ov prvi standardni dilatometar



- a measuring grid bonded to paper with cellulose lacquer
- b connecting wires
- c insulating supports
- d felt cover for protecting the measuring grid
- e temporary bracket which is removed after application

Primena mernih traka

Istorija



Dear Professor Ruge:

The Patent Committee has considered your communication of February 20, 1939, relating to Resistance Strain Gages, Wire Type.

It appears that this work probably involves invention and that it comes within the category of our patent policy which applies to inventions arising from the programs of research in Institute laboratories.

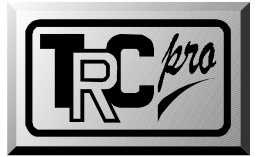
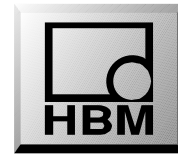
It is the general policy of the Committee, however, to pay attention primarily to matters which may prove to be of major importance and, while this development is interesting, the Committee does not feel that the commercial use is likely to be of major importance.

Accordingly, the Committee has voted that any rights which the Institute may have in this invention should be waived in your favor. This leaves you free to treat the invention entirely as a personal matter.

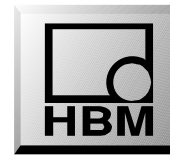
Sincerely yours,

**Odgovorni
iz komiteta
nisu
verovali u
praktičnu
primenu!!**





OBLASTI PRIMENE MERNIH TRAKA

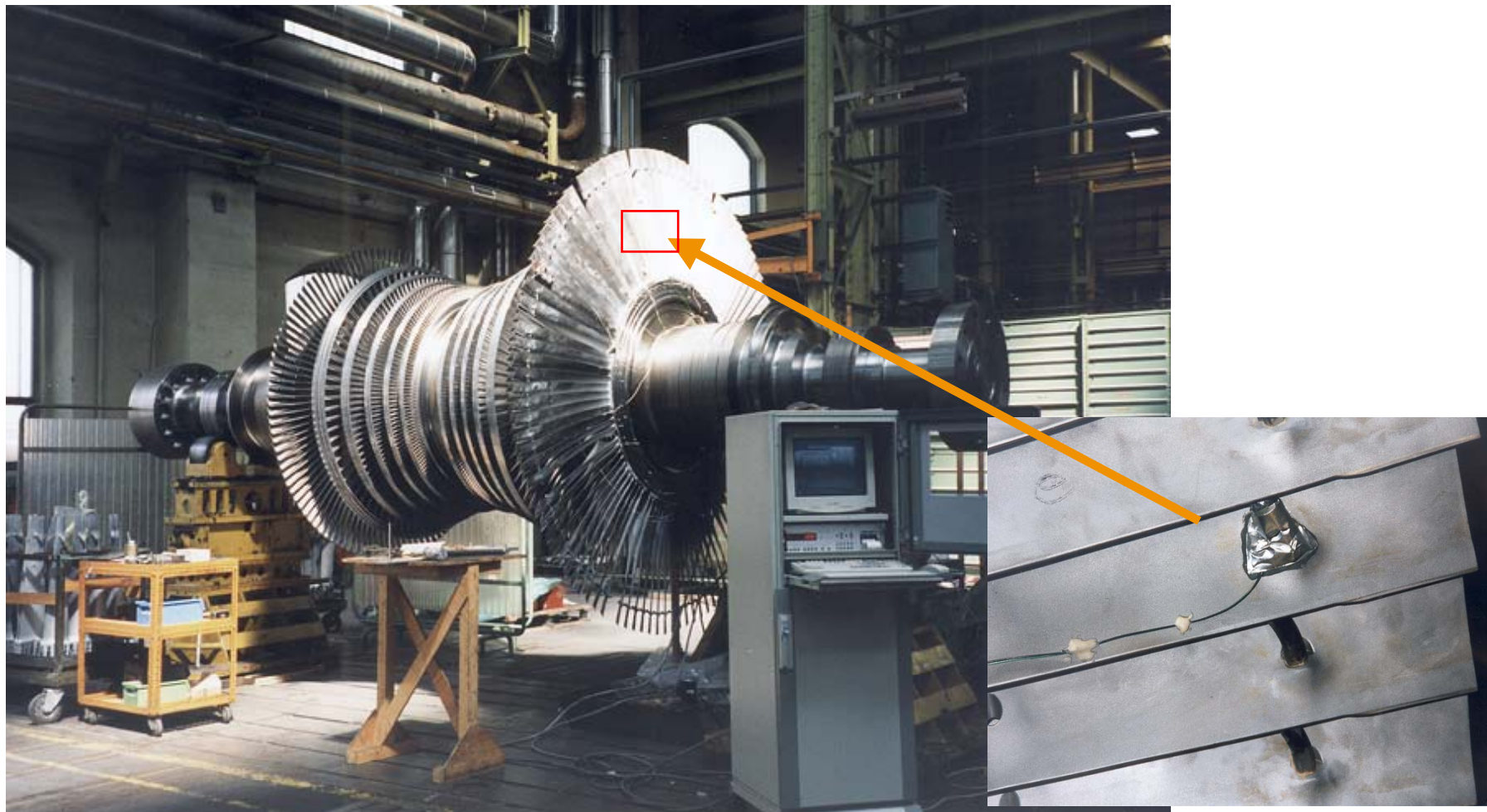
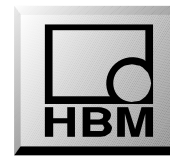


Analiza napona u konstrukcijama:

- ***Jednoosno naponsko stanje***
- ***Ravansko naponsko stanje***
- ***Zaostali naponi***
- ***Termički naponi***
- ***Gradijenti napona***

Primena mernih traka

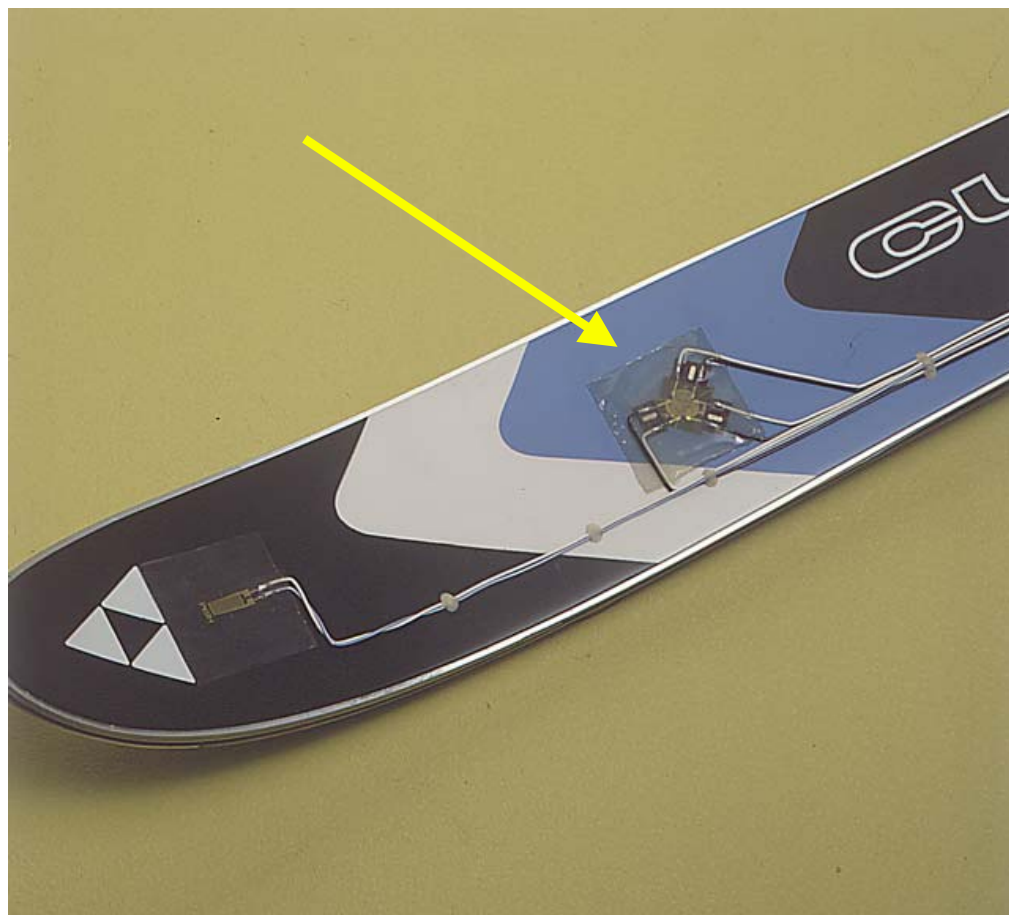
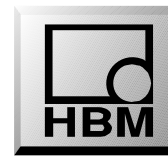
Primeri primene



Merenje napona na turbini

Primena mernih traka

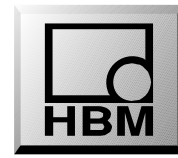
Primeri primene



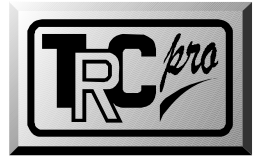
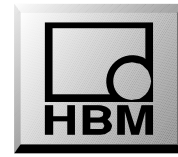
Merenje napona na skiji

Primena mernih traka

Primeri primene



Merenje zaostalih napona na sudu pod pritiskom



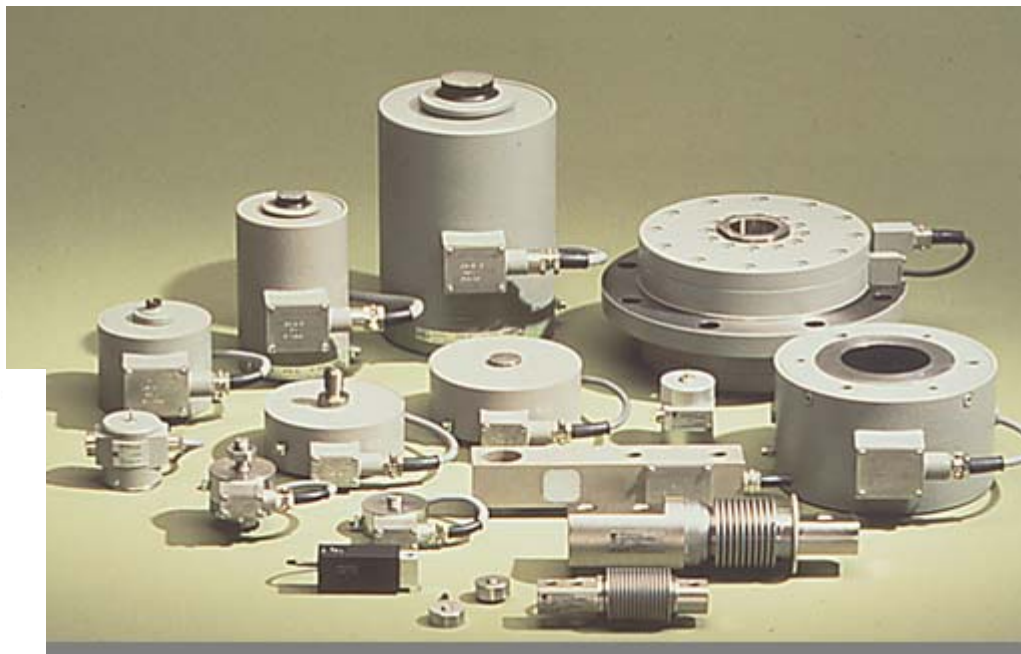
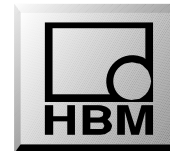
Konstrukcija mernih pretvarača za merenje mehaničkih veličina, i to:

- ***Merenje dilatacija i napona***
- ***Merenje sile i mase***
- ***Merenje obrtnog momenta***
- ***Merenje pritiska***
- ***Merenje pomeranja***
- ***Merenje vibracija***

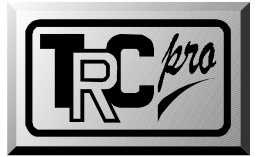
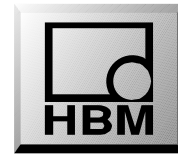
Statička, kvazistatička i dinamička merenja na konstrukcijama i delovima mašina.

Primena mernih traka

Oblasti primene



Pretvarači sile, mase, momenta i pritiska - HBM

A large, faded watermark in the background shows a circular strain gauge pattern with the letters 'HBM' at the top and 'M' at the bottom, and a central 'U' shape.

MEHANIČKA NAPREZANJA U KOD ANALIZE ČVRSTOĆE

Naponi su posledica raznih uzroka:

...od mehničkog opterećenja



...zaostali napon



...termički indukovani



Rezultat: normalni - ili tangencijalni naponi u konstrukciji

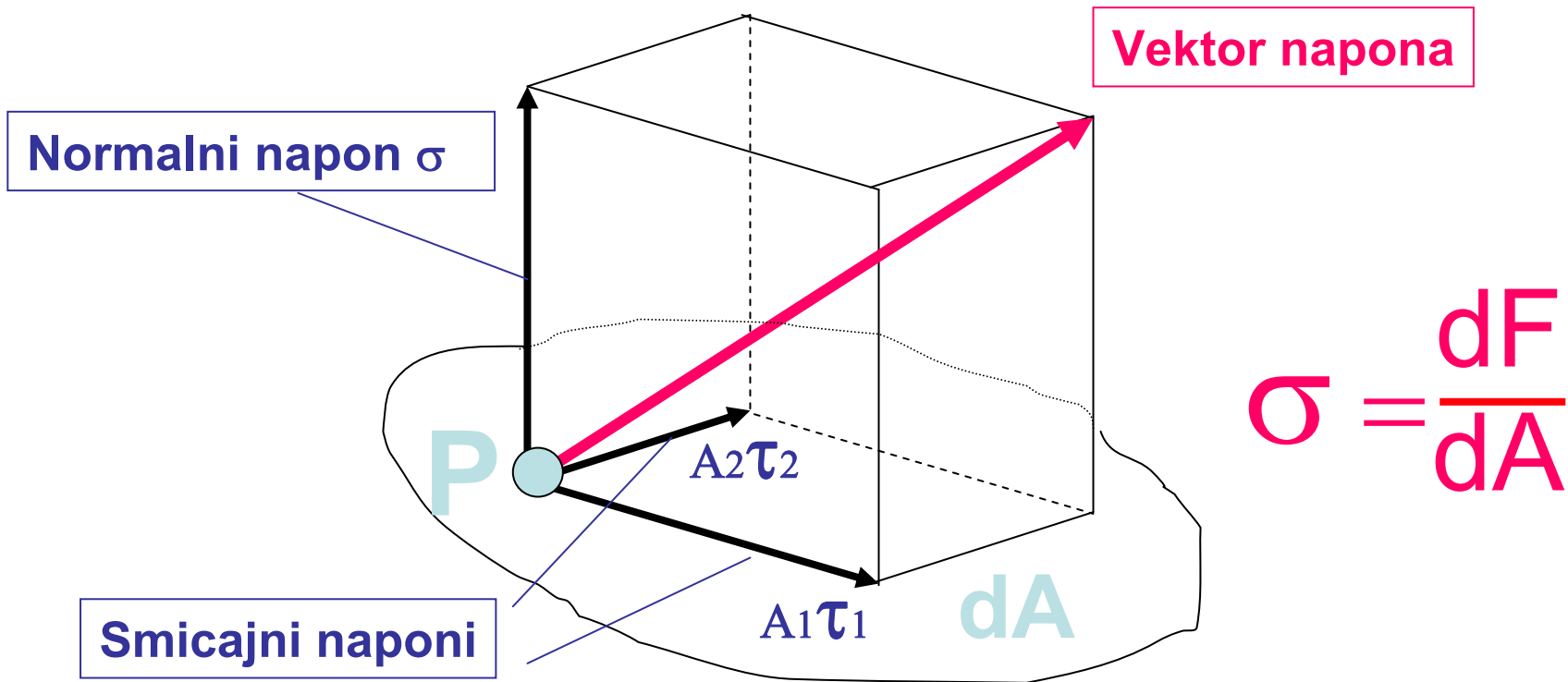
- Sa aspekta analize čvrstoće vrsta naprezanja je nezavisna od uzroka koji do toga dovodi!
- Sa aspekta pravca delovanja razlikujemo sledeća naponska stanja:

- **jednoosno** (x) →

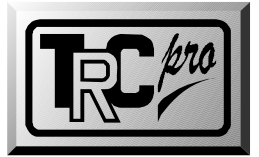
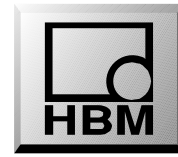
- **dvoosno (ravansko)** (x,y) ↗

- **troosno (prostorno)** (x,y,z) ↗↗

Pojam mehaničkog naprezanja σ se definiše kao dejstvo sile na referentnoj površini

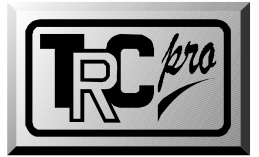
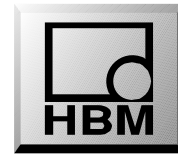


Komponente vektora napona na površinskom elementu



VEZA NAPONA I DEFORMACIJE

(...od dilatacije ka naponu!)

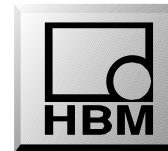


Jednoosno naponsko stanje*

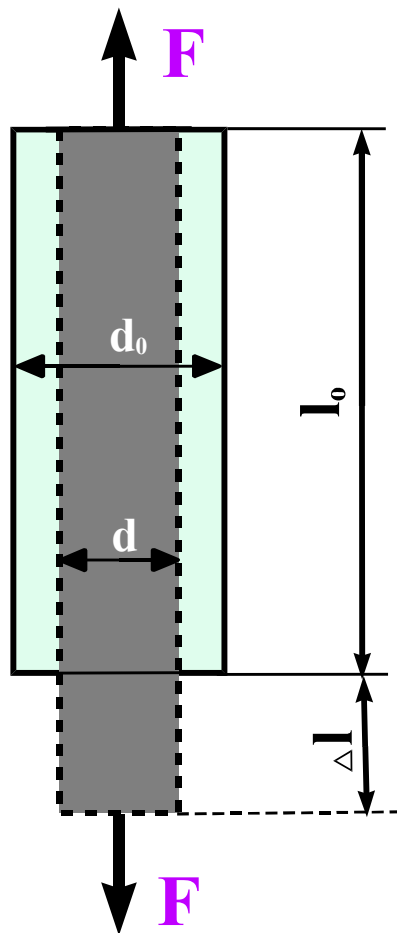
* Javlja se samo kod štapova operećenih na pritisak i/ili istežanje

Veza napon-deformacija

Jednoosno naponsko stanje



Primer: Štap opterećen na istežanje-pritisak



$$\sigma_n = \frac{F}{A} \quad \varepsilon_n = \frac{\Delta l}{l}$$

$$\varepsilon_p = \frac{(d - d_0)}{d_0} \quad \mu = -\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_n}$$

A-površ. popr. preseka

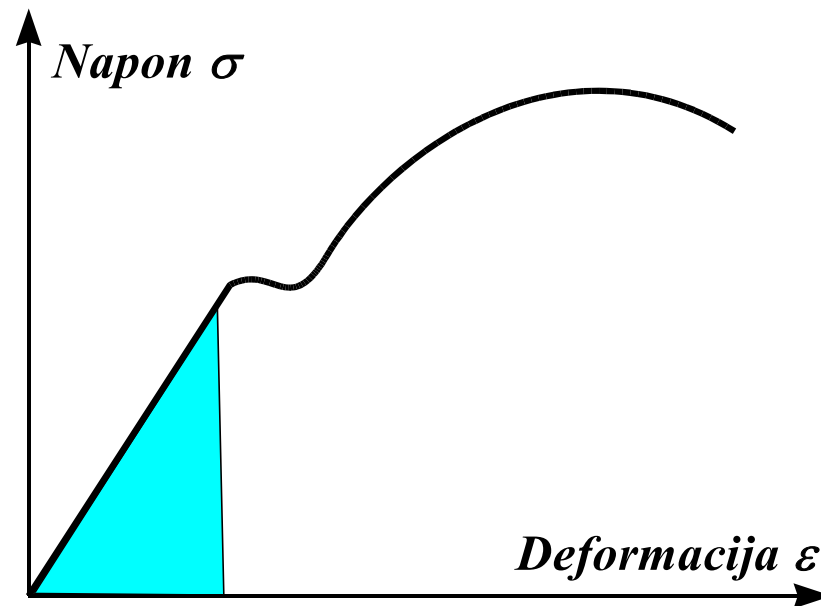
F-sila

σ_n -normalni napon

ε_n -deformacija

ε_p -popr. deformacija

μ -Poissonov koef.

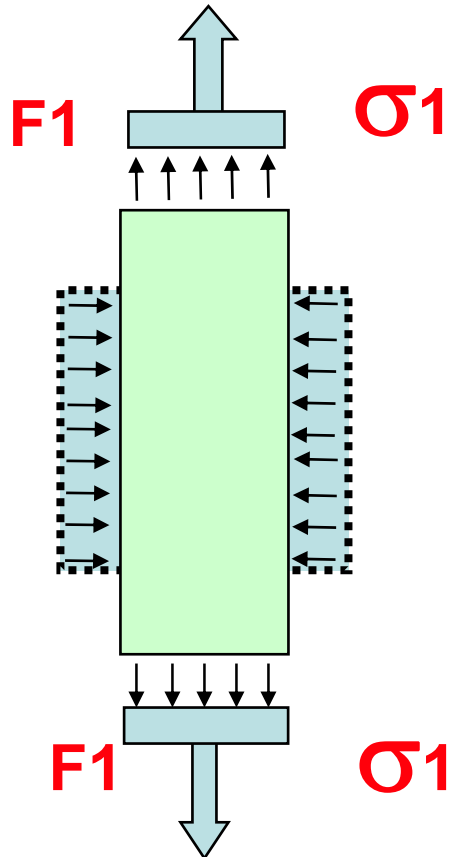


$$\sigma_n = E \cdot \varepsilon_n$$

E-modulo elastičnosti

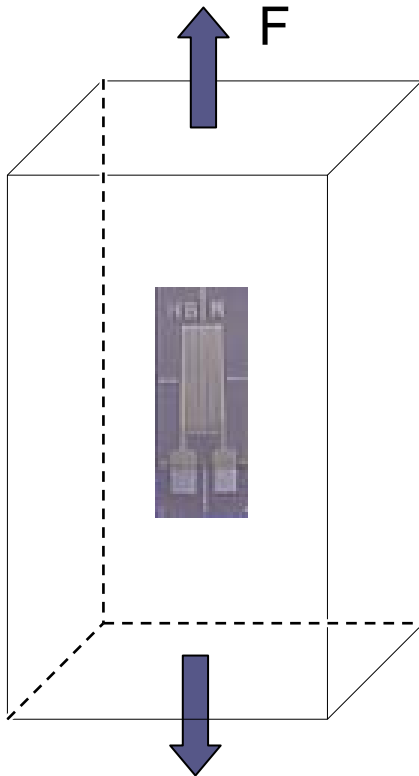


Primer: Štap opterećen na
istežanje/pritisak



Maksimalan napona istezanja, odn. pritiska javlja u pravcu dejstva sile.

šematski prikaz deformacije ploče.



- poznato je: jednoosno stanje napona
- nepoznato je: Iznos (veličina) σ

Rešenje:

- Dilatacija ε se neri sa jednom Linearnom – Mernom trakom
- Proračun napona

$$\sigma = \varepsilon \cdot E$$

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

σ – mehaničko naprežanje

ε – mehanička dilatacija

F – Sila A – Poprečni presek

E – Modul elastičnosti

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Hook-ov zakon

(U prikazanoj formi važi samo za jednoosno stanje napona)

Jednoosno naponsko stanje

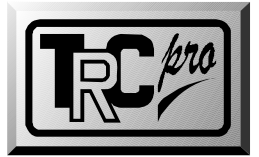
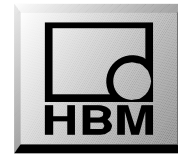
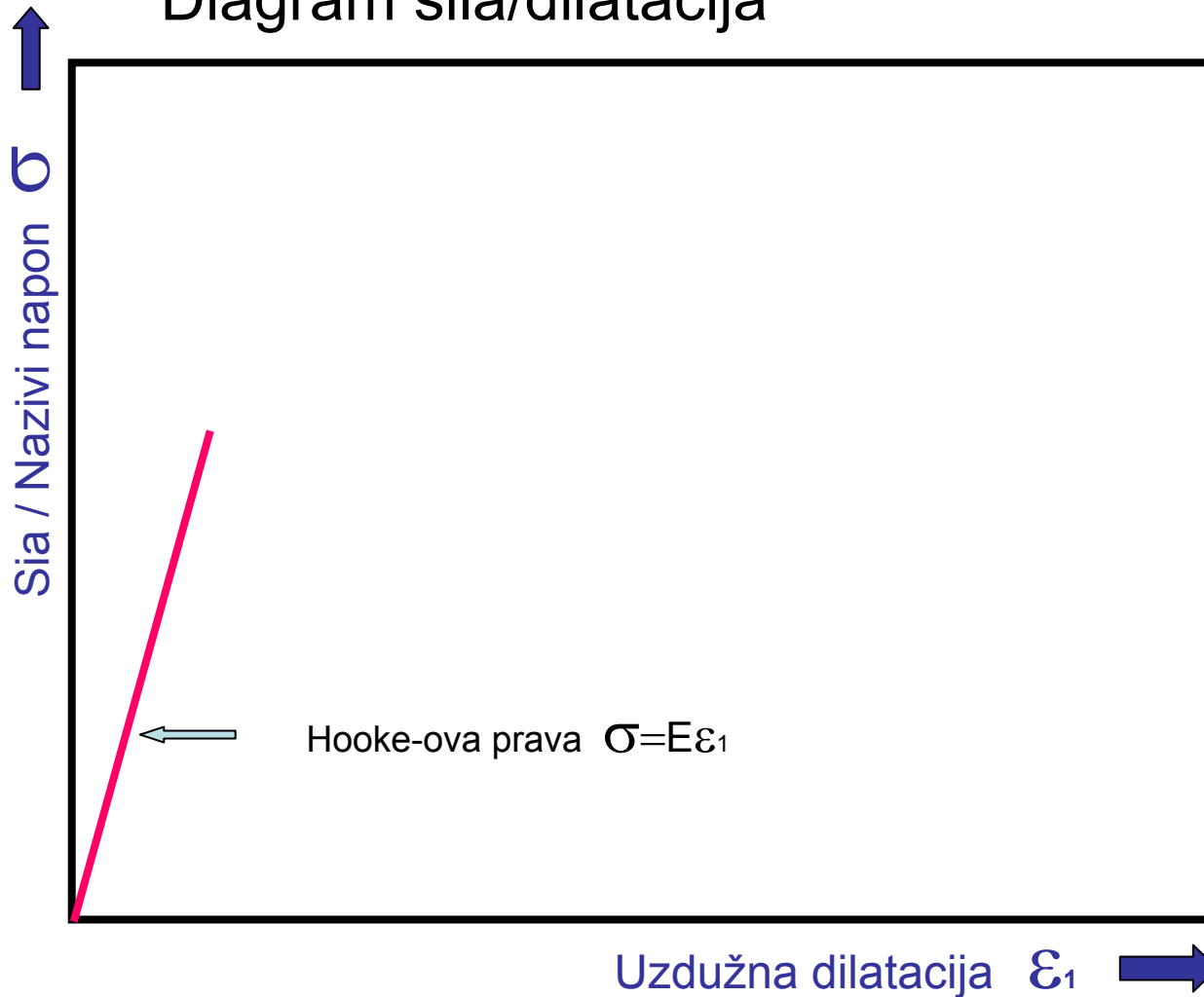
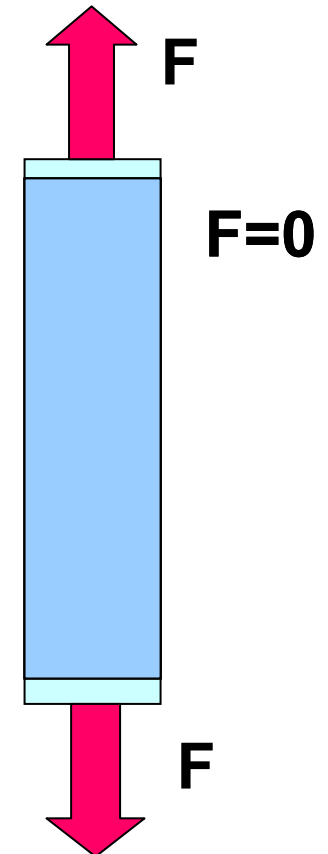


Diagram sila/dilatacija



Uzorak



Jednoosno naponsko stanje

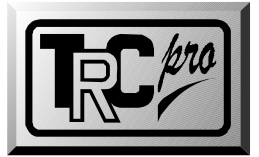
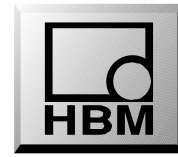
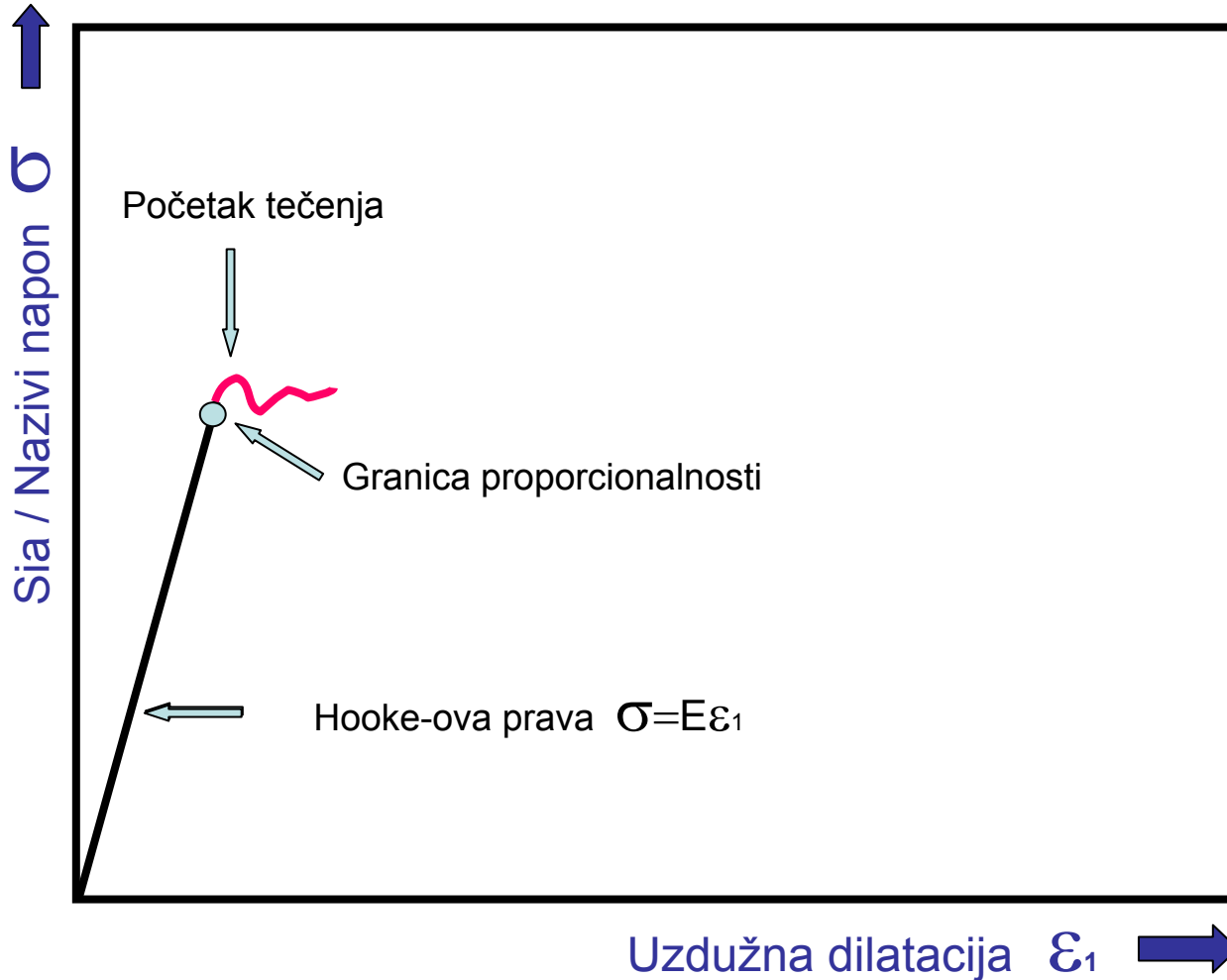
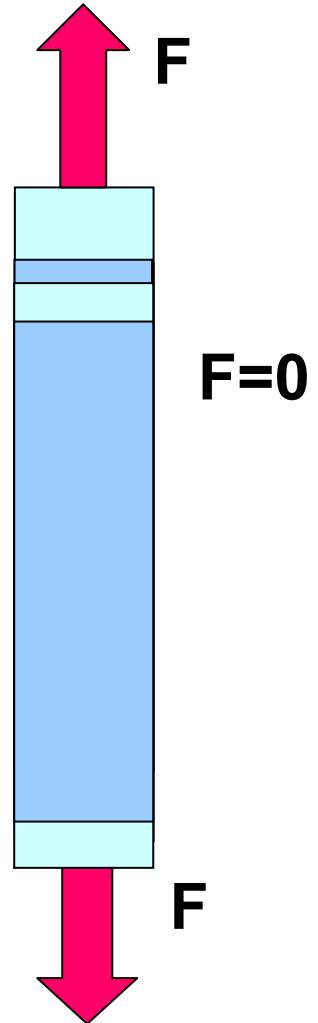


Diagram sila/dilatacija



Uzorak



Jednoosno naponsko stanje

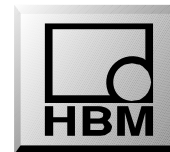
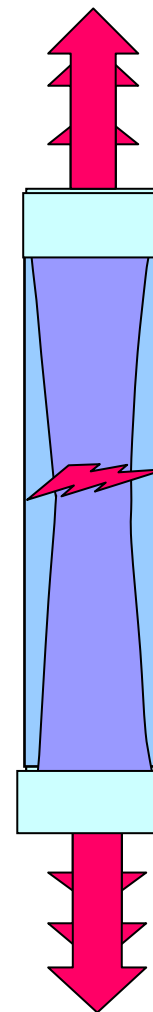
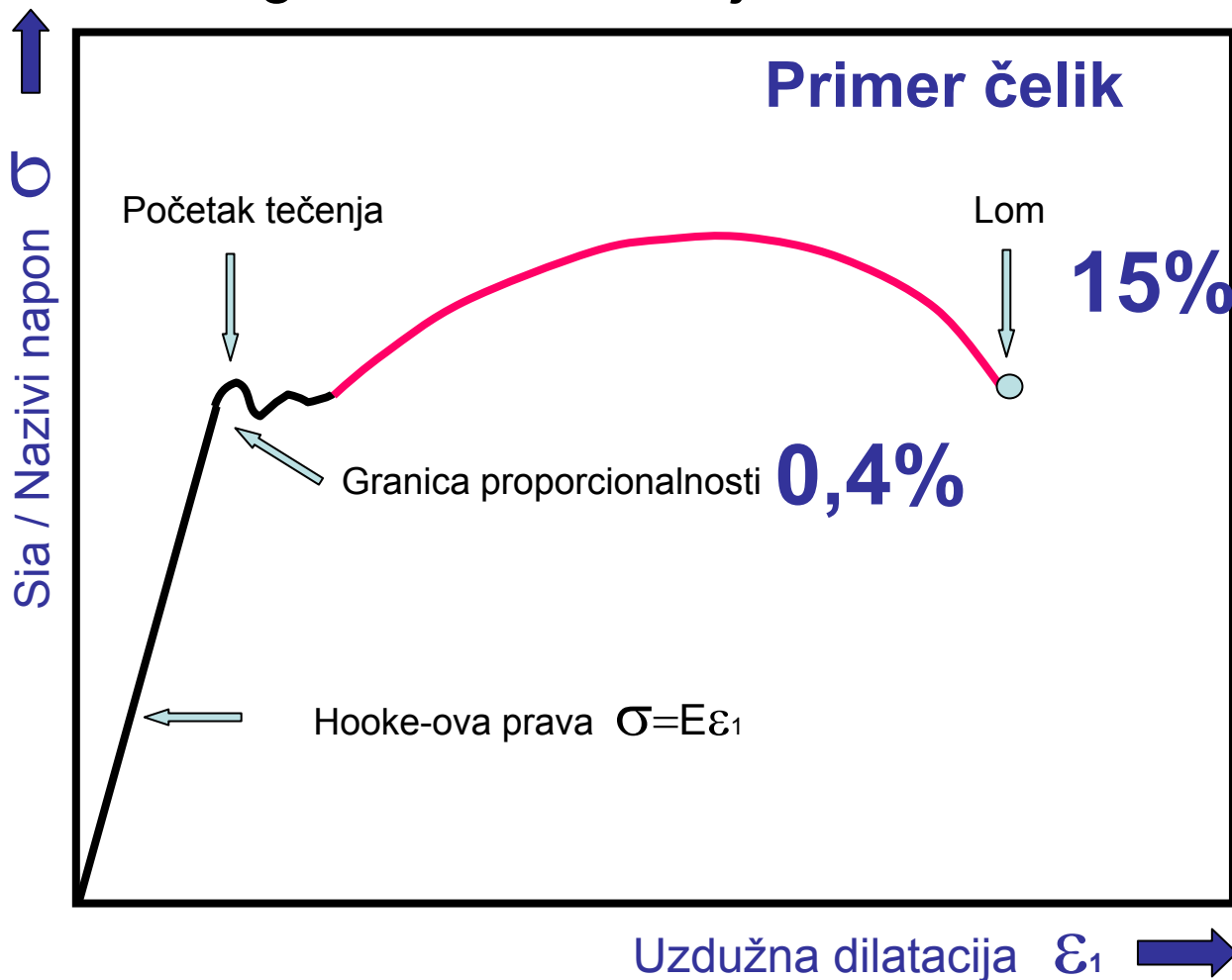
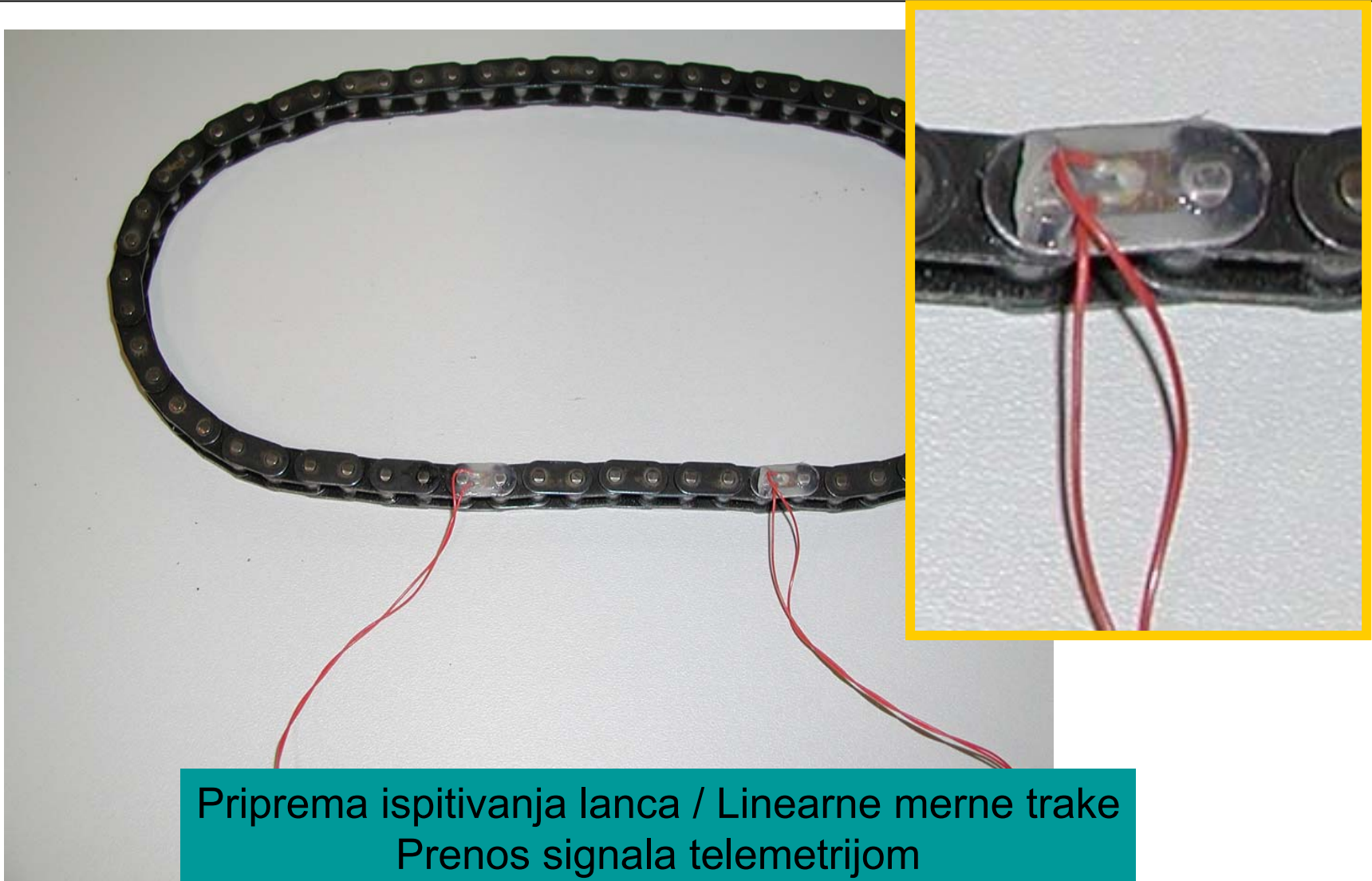
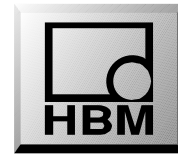


Diagram sila/dilatacija



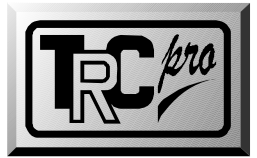
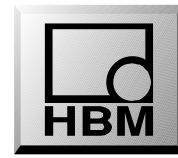
Jednoosno naponsko stanje



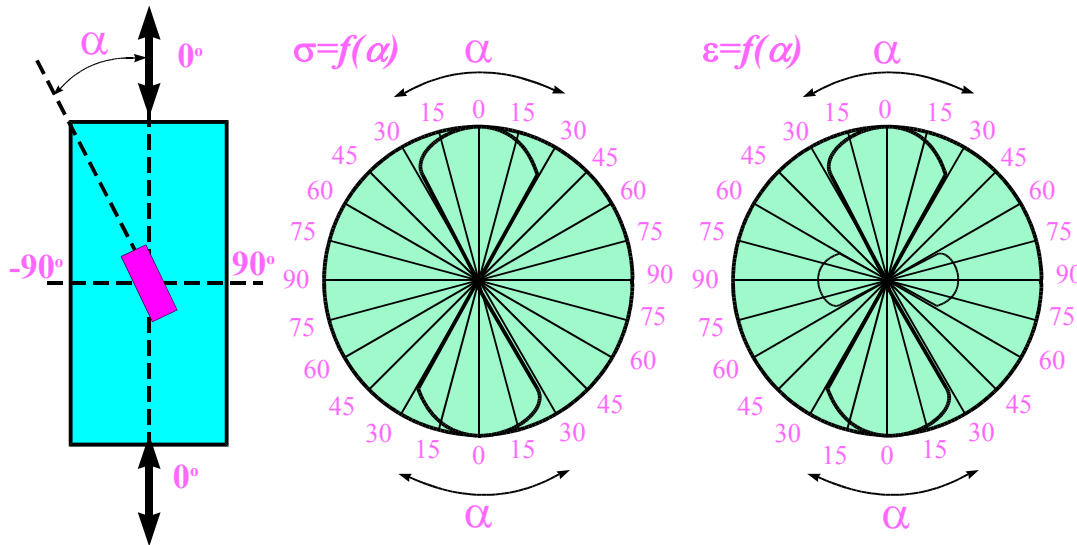
Priprema ispitivanja lanca / Linearne merne trake
Prenos signala telemetrijom

Veza napon-deformacija

Jednoosno naponsko stanje



Raspored napona i deformacija u aksijalno opterećenom štapu:



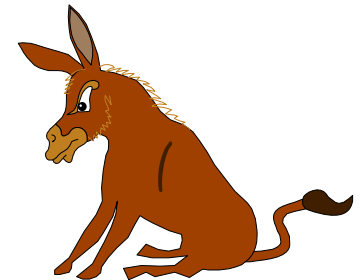
Zapaziti: Naponsko stanje je jednoosno, dok je stanje deformacija ravansko!

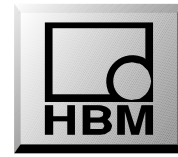
$$\varepsilon = f(\alpha) = \frac{1}{2} \varepsilon_o [1 - \mu + \cos \alpha \cdot (1 + \mu)]$$

$$\sigma = f(\alpha) = \sigma_{\max} (1 + \cos \alpha)$$

Naponi u materijalu moraju biti određeni iz izmerenih deformacija, korišćenjem Hooke-vog zakona, u slučaju da je napon meren u aktivnom pravcu sile.

U transverzalnom pravcu (90°) nema napona, uprkos merljivim deformacijama u tom pravcu.

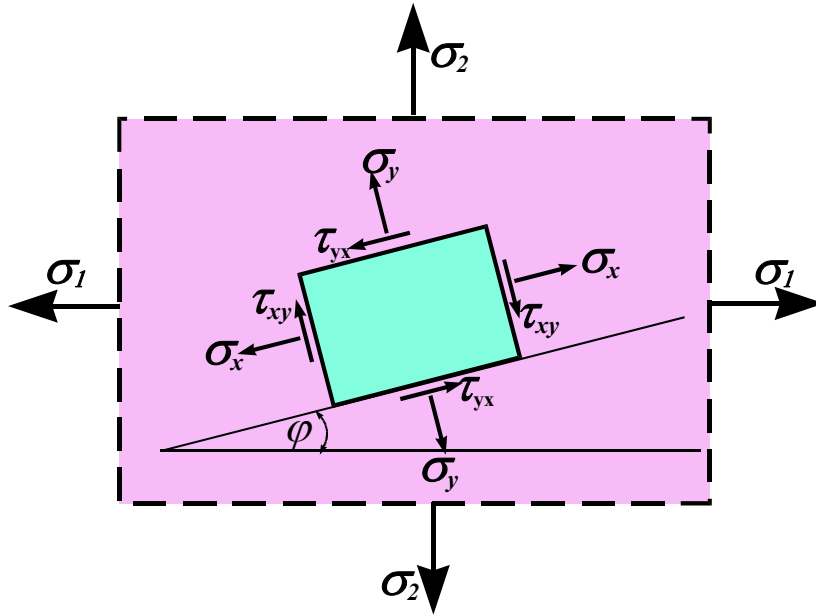
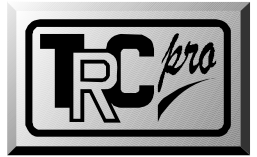
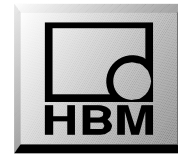




Dvoosno naponsko stanje (ravansko) napansko stanje sa poznatim pravcima delovanja glavnih napona

Veza napon-deformacija

Dvoosno naponsko stanje

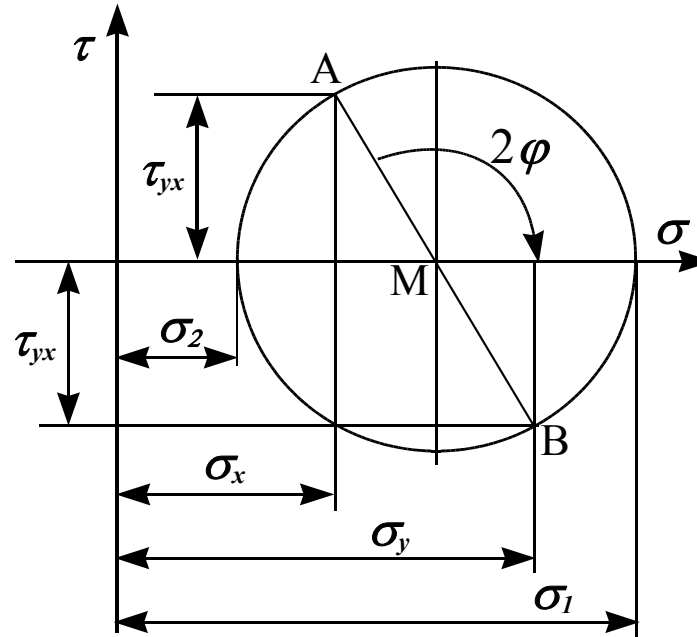


*U uslovima ravanskog stanja napona, ekstremni **NORMALNI NAPONI** σ_1 i σ_2 , se javljaju u međusobno upravnim pravcima 1 i 2. Ovi se naponi (σ_1 i σ_2) nazivaju **GLAVNI NAPONI**, a odgovarajući pravci (1 i 2) **GLAVNI PRAVCI**. U ovim pravcima **SMICAJNI NAPONI** su jednaki nuli ($\tau=0$).*

$$\sigma_x = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\varphi$$

$$\sigma_y = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\varphi$$

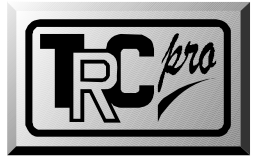
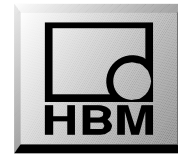
$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\varphi$$



Mohr-ov krug: grafički prikaz napona u σ - τ koordinatnom sistemu.

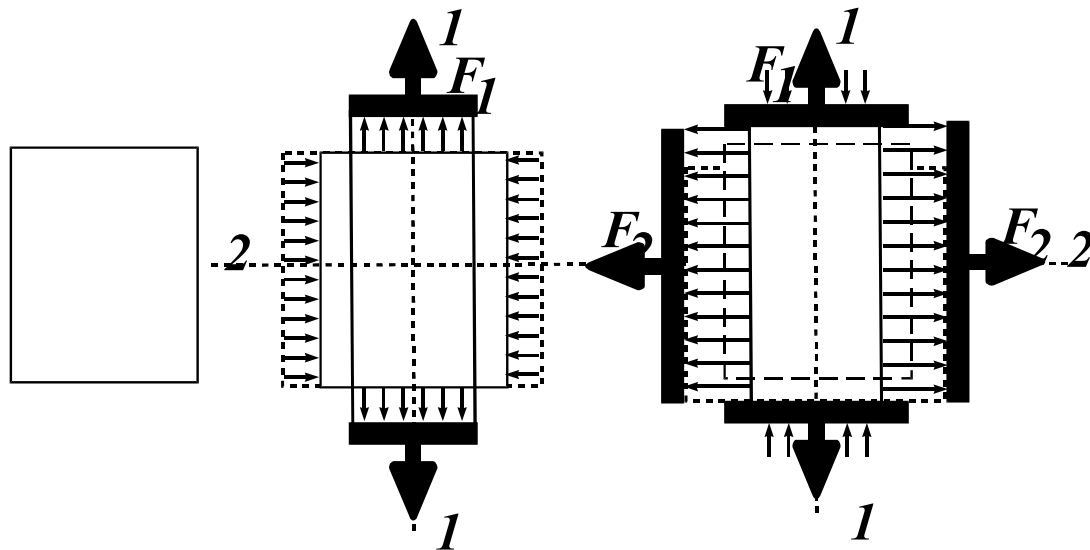
Veza napon-deformacija

Dvoosno naponsko stanje



Određivanje glavnih napona

Slučaj a: Glavni pravci su poznati.

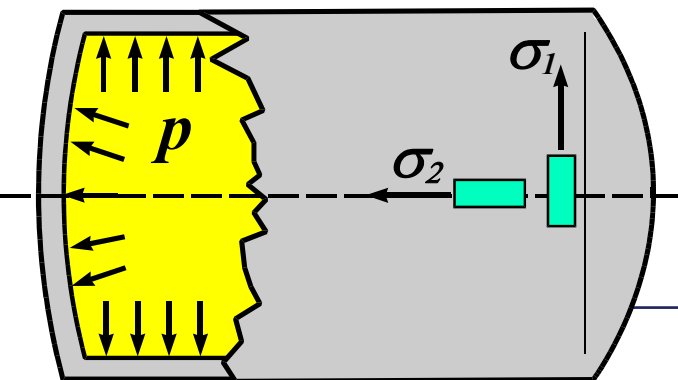


*Efekat
TRANSVERZALNE
DEFORMACIJE se
sračunava primenom
proši-rene verzije Hooke-
ovog zakona:*

$$\sigma_1 = \frac{E}{1 - \mu^2} \cdot (\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2)$$

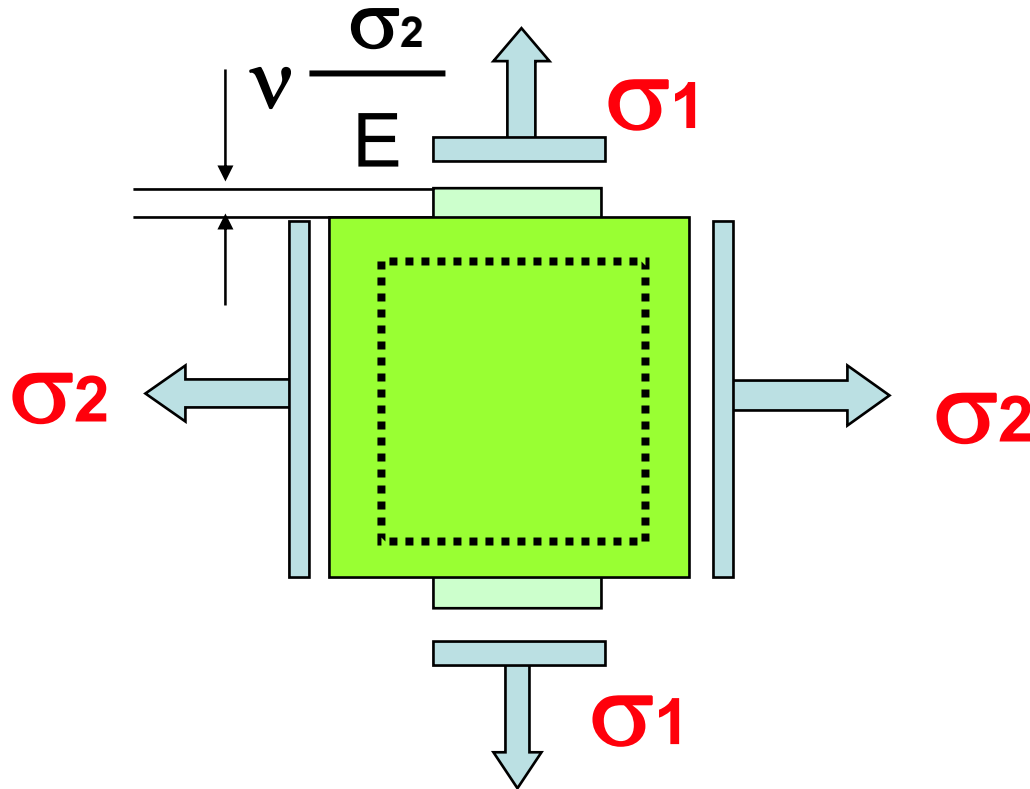
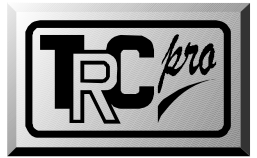
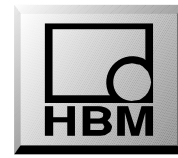
$$\sigma_2 = \frac{E}{1 - \mu^2} \cdot (\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1)$$

PRIMER: Sud pod pritiskom



Na spoljašnjoj površini vlada ravansko na-ponsko stanje. Glavni naponi su sračunati primenom gornjih obrazaca.

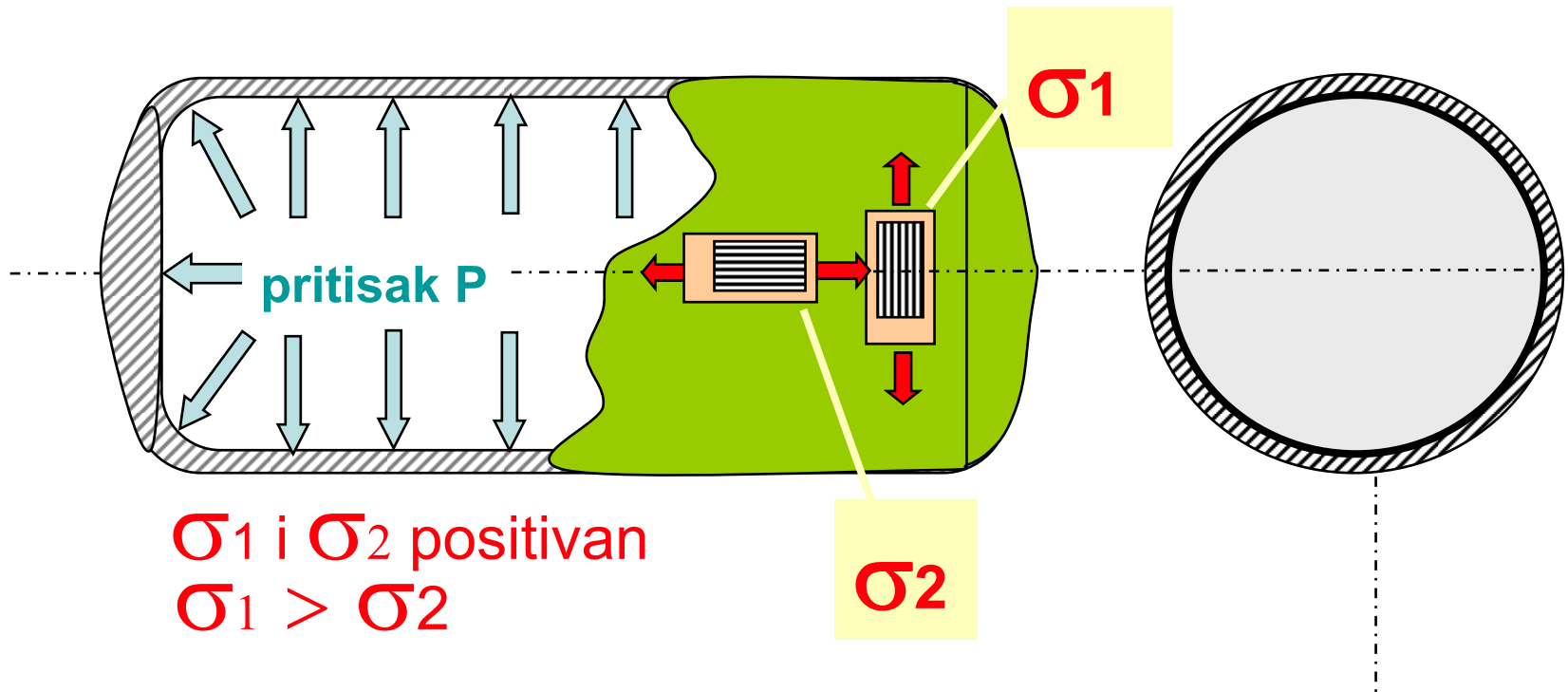
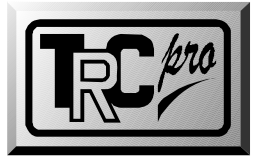
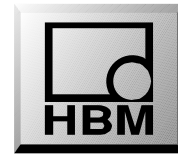
Dvoosno-ravansko stanje napona u slučaju poznatih pravaca delovanja glavnih napona



Sile koje dovode do napona, javljaju se u dve normalne ose (90°) auf.

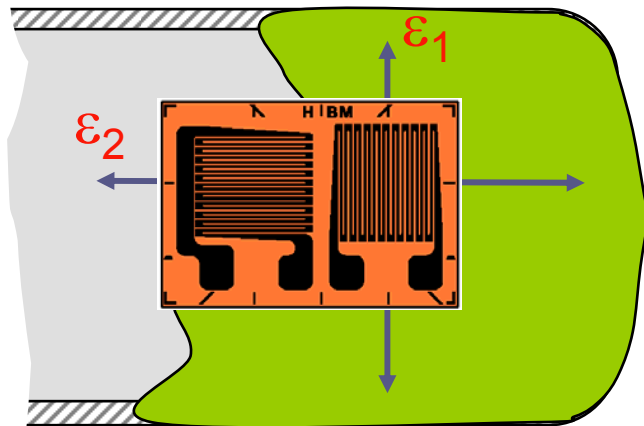
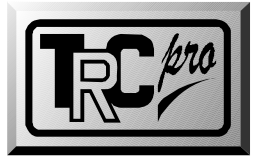
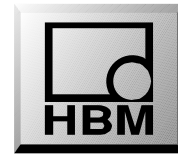
šematski prikaz deformacije ploče

Dvoosno-ravansko stanje napona u slučaju poznatih pravaca delovanja glavnih napona



Primer: posuda opterećena unutrašnjim pritiskom kružnog poprečnog preseka

Dvoosno-ravansko stanje napona u slučaju poznatih pravaca delovanja glavnih napona



Posuda pod pritiskom

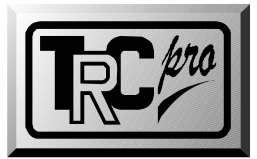
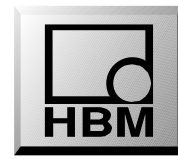
- poznato je: dvoosno stanje i pravci glavnih napona
- nepoznato je: Iznos σ_1 i σ_2

Rešenje:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1)$$

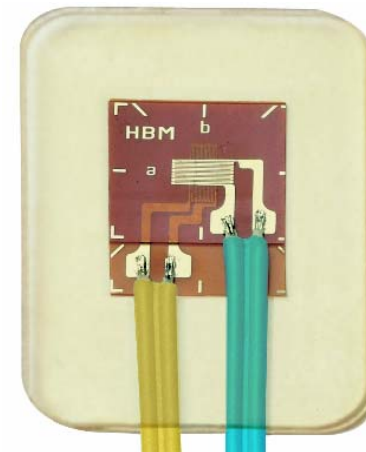
Dvoosno-ravansko stanje napona u slučaju poznatih pravaca delovanja glavnih napona

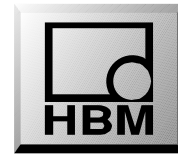


XY3x
od 0,6 mm
do 6 mm
Aktivne dužine

Primeri mernih traka za merenje dvoosnog stanja napona kod poznatih pravaca glavnih napona

XV 91
Kapslovana M.T.

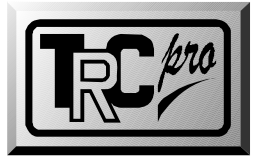
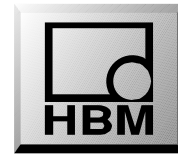




Dvoosno naponsko stanje (ravansko) napansko stanje sa **nepoznatim** pravcima delovanja glavnih napona

Veza napon-deformacija

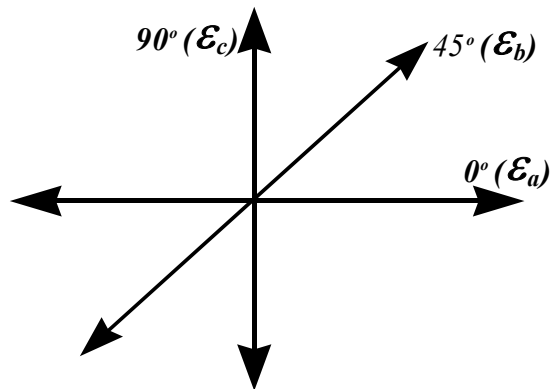
Dvoosno naponsko stanje



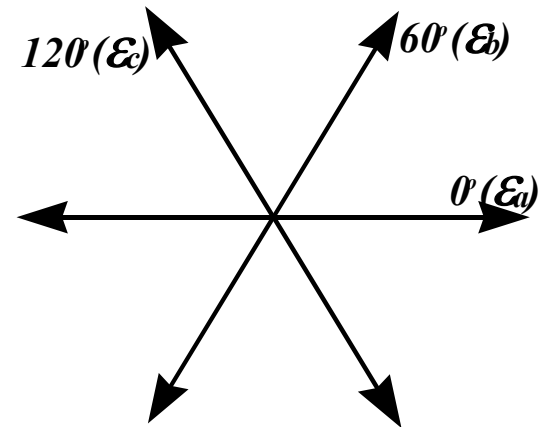
Određivanje glavnih napona

Slučaj b: Glavni pravci nisu poznati.

U slučaju da objekat merenja ima kompleksnu geometriju/opterećenje merenje deformacija se vrši u tri različita pravca za svaku mernu tačku (ε_a , ε_b , ε_c). Ovo se izvodi korišćenjem tzv. ROZETA.



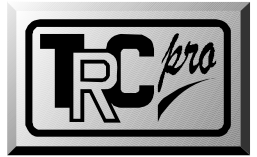
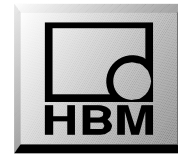
$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{1-\mu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{2} \pm \frac{E}{\sqrt{2} \cdot (1+\mu)} \cdot \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c}{3}\right)^2 + \frac{1}{3}(\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2}$$



$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{1-\mu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \pm \frac{E}{\sqrt{2} \cdot (1+\mu)} \cdot \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2}$$

Veza napon-deformacija

Dvoosno naponsko stanje

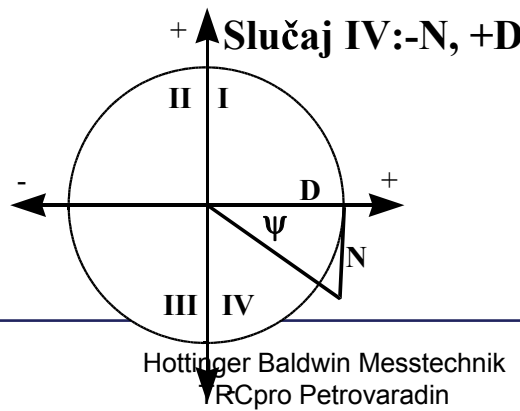
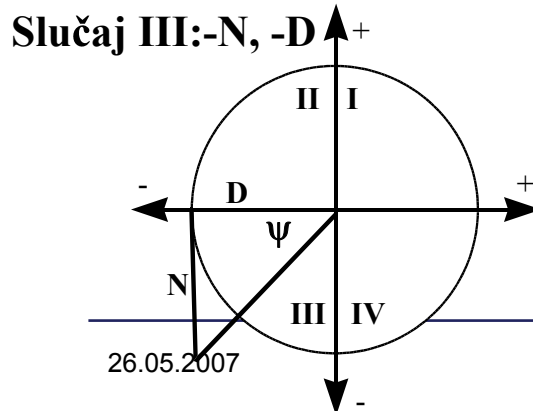
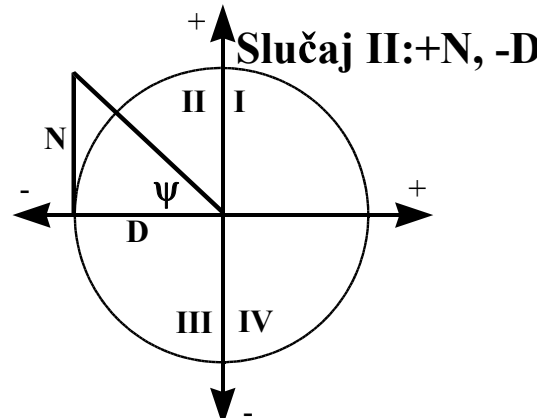
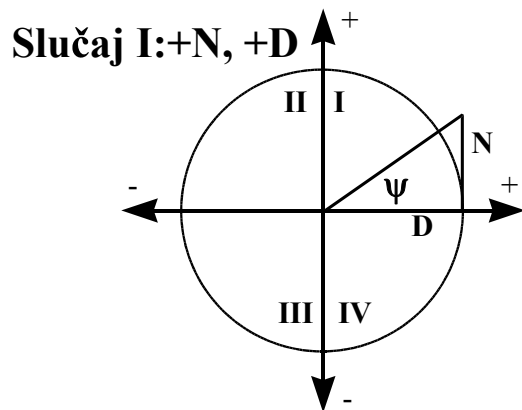


Određivanje glavnih pravaca

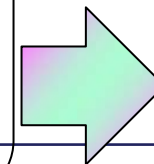
Glavni pravci su oni pravci u kojima se javljaju glavni naponi σ_1 i σ_2 .

Sračunavanje pomoćnog ugla ψ :

Rozete $0^\circ/45^\circ/90^\circ$	Rozete $0^\circ/60^\circ/120^\circ$
$\operatorname{tg} \psi = \frac{2\varepsilon_b - \varepsilon_c - \varepsilon_a}{\varepsilon_a - \varepsilon_c} \left(\frac{N}{D} \right)$	$\operatorname{tg} \psi = \frac{2(\varepsilon_b - \varepsilon_c)}{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c} \left(\frac{N}{D} \right)$



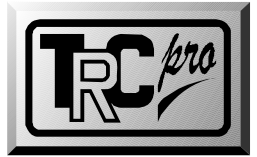
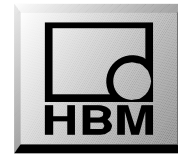
Zavisno od predznaka N i D dobijaju se četiri različita slučaja.



$$\psi = \arctan \left[\frac{N}{D} \right]$$

Veza napon-deformacija

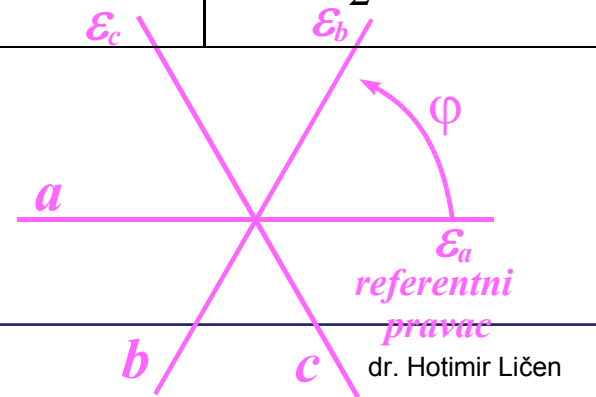
Dvoosno naponsko stanje



Sračunavanje ugla φ korišćenjem sledeće šeme:

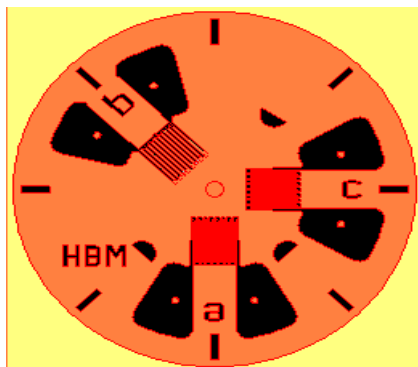
N	$\geq 0 (+)$	$> 0 (+)$	$\leq 0 (-)$	$< 0 (-)$
D	$> 0 (+)$	$\leq 0 (-)$	$< 0 (-)$	$\geq 0 (+)$
	I	II	III	IV
$\varphi =$	$\frac{1}{2} (0^\circ + \psi)$	$\frac{1}{2} (180^\circ - \psi)$	$\frac{1}{2} (180^\circ + \psi)$	$\frac{1}{2} (360^\circ - \psi)$

Ugao φ mora biti definisan u odnosu na osu referentne merne trake (a) u matematički pozitivnom smeru.



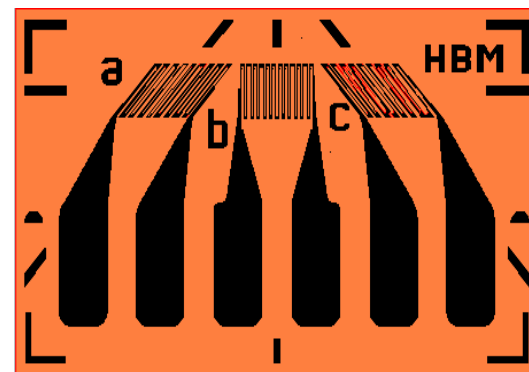
Merenje se sprovodi putem rozeta

M.T. za analizu dvoosnog stanjanapona kod
nepoznatih glavnih pravaca (pravca delovanja
glavnih napona)



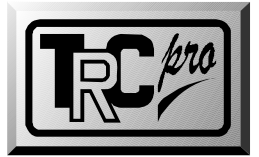
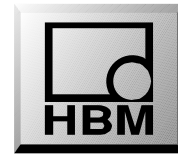
-Serija Y-

na.pr.
Rozeta sa tri vlakna
RY3x-3/120



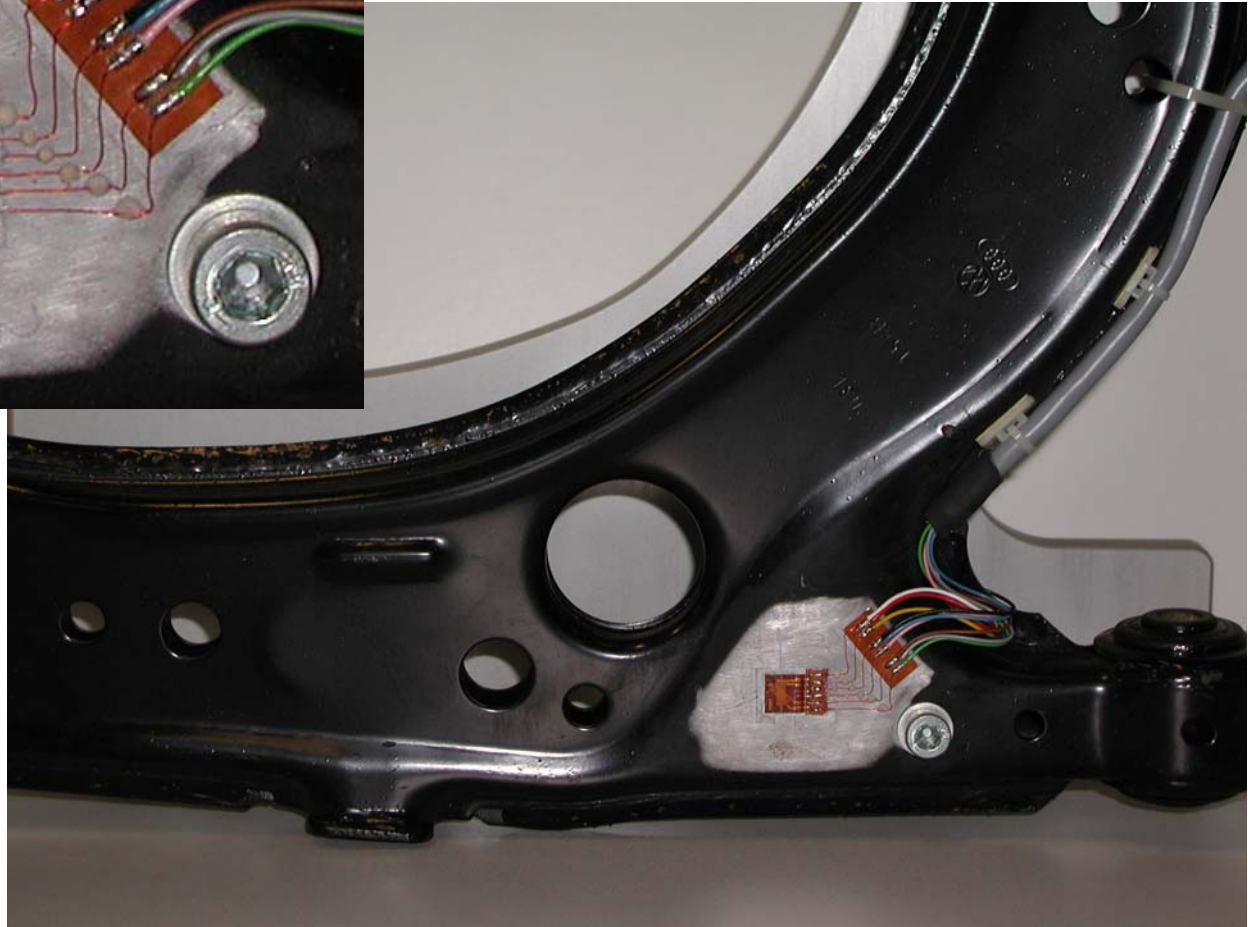
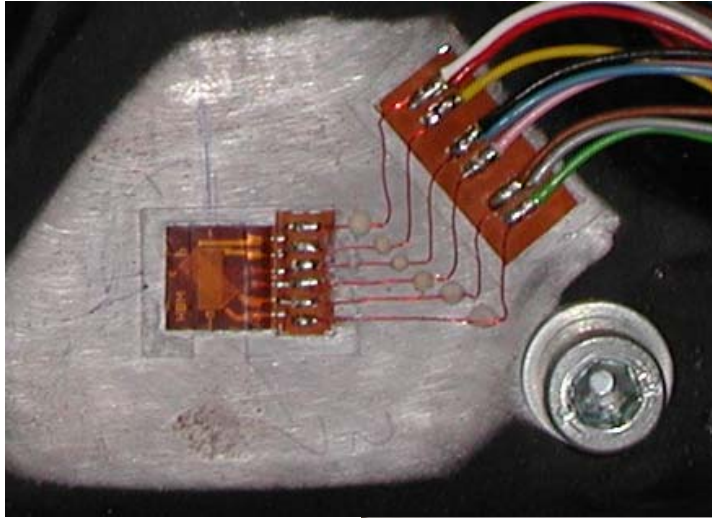
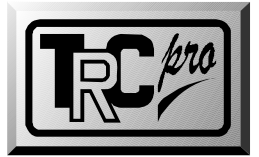
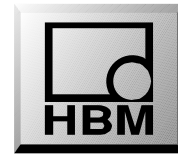
na. pr.
Miniaturna rozata
RY81-0,6/120

Dvoosno naponsko stanje sa **nepoznatim** pravcima glavnih naponan

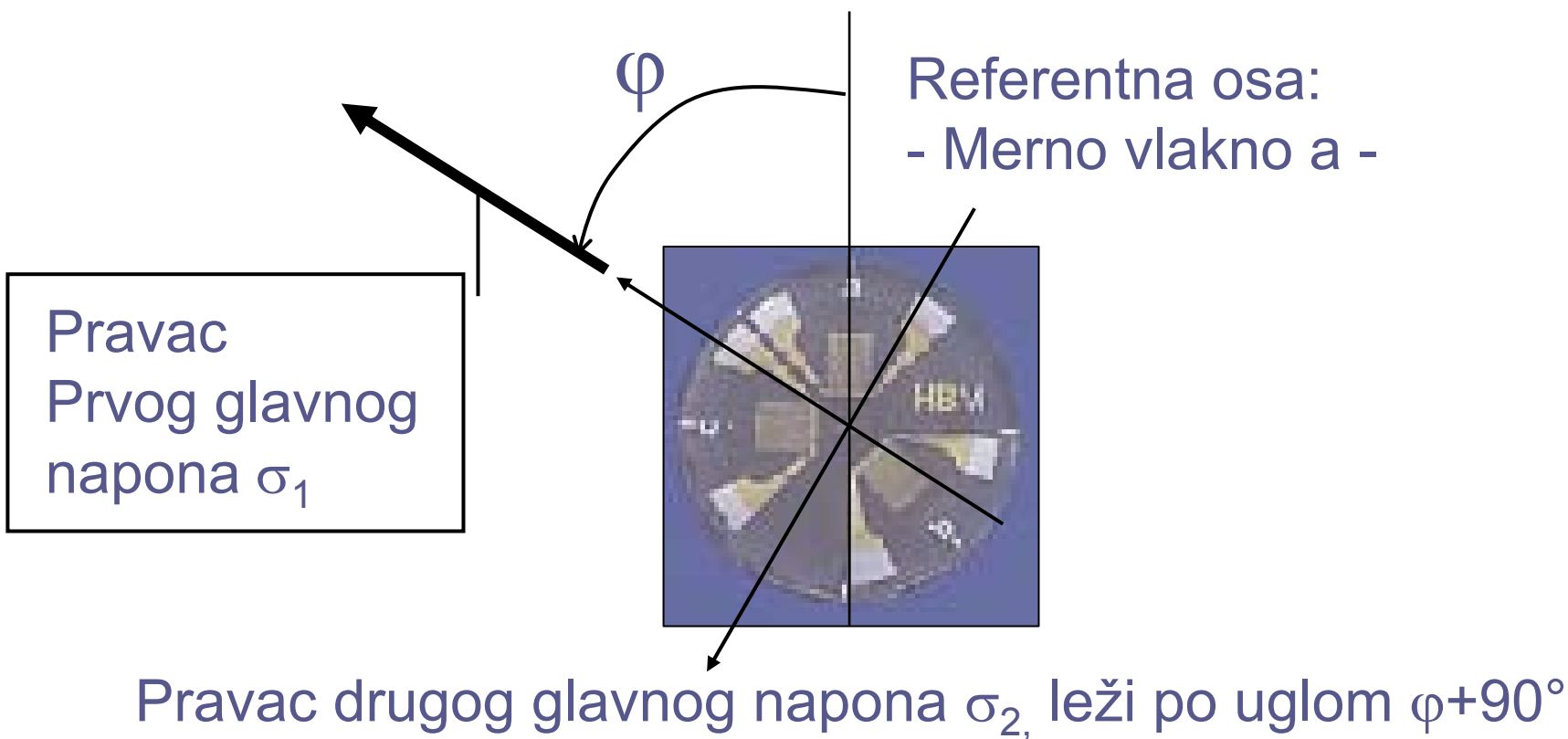


Applikacija rozete
na karoserji
teretnog vozila

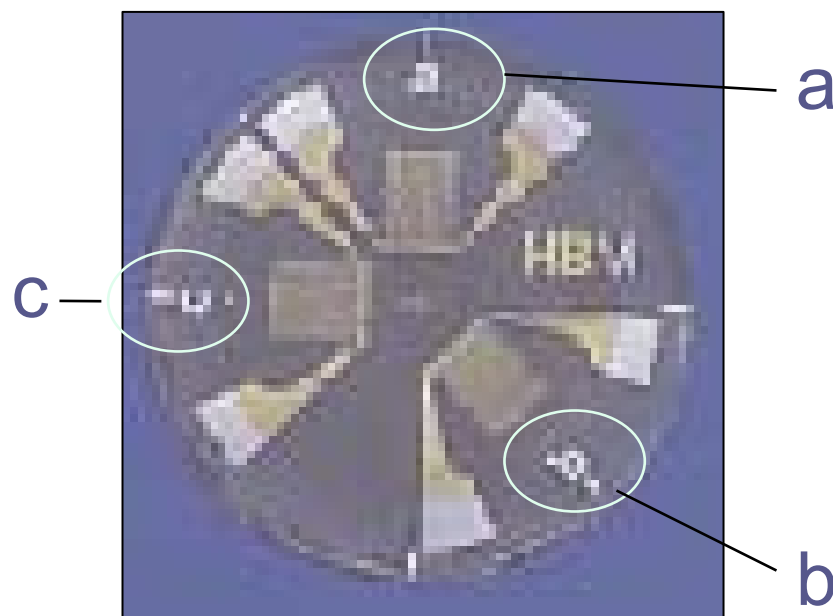
Dvoosno naponsko stanje sa **nepoznatim** pravcima glavnih naponan



Merenje sa rozetom $0^\circ/45^\circ/90^\circ$



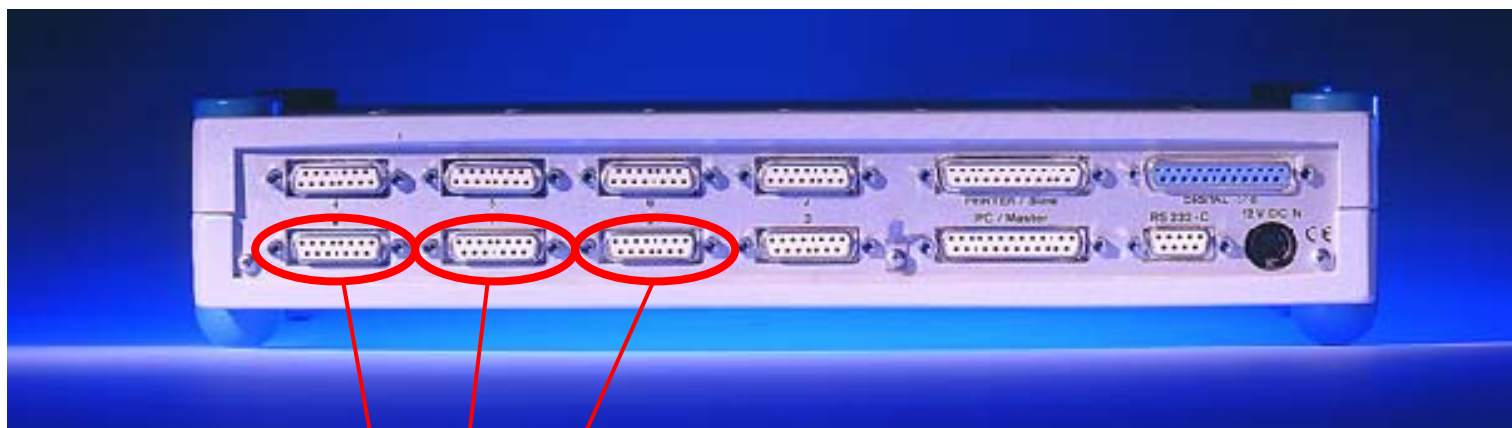
Merenje rozetom 0°/45°/90°



Merna vlakna se uvek povezuju kao tri nezavisna ¼ mosta !

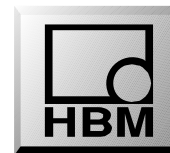
$$\sigma_{1/2} = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \pm \frac{E}{\sqrt{2}(1+\nu)} \cdot \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2}$$

Priključak na merno pojačalo uvek kao tri
nezavisna $\frac{1}{4}$ mosta!



Merno vlakno a, b, c

na.pr. Spider8-30



Primer: Konzola opterećena na savijanje

Merene dilatacije:

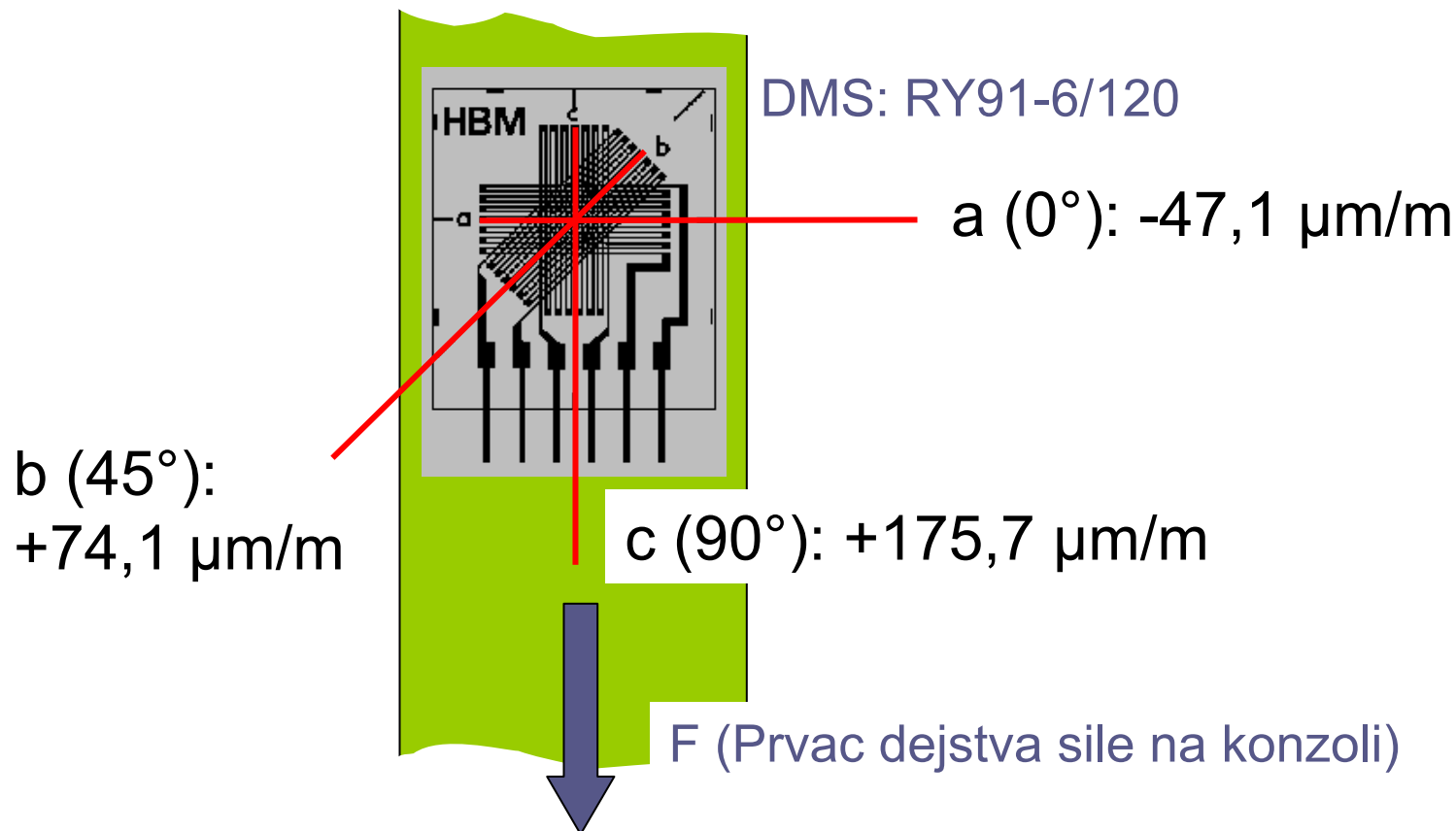
$$\varepsilon_a: -47,1 \mu\text{m/m}$$

$$\varepsilon_b: +74,1 \mu\text{m/m}$$

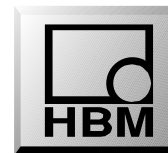
$$\varepsilon_c: +175,7 \mu\text{m/m}$$

Kako nastaju te vrednosti?

Dvoosno naponsko stanje sa **nepoznatim** pravcima glavnih naponan



Dvoosno naponsko stanje sa **nepoznatim** pravcima glavnih naponan



$$\sigma_{1/2} = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \pm \frac{E}{\sqrt{2}(1+\nu)} \cdot \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2}$$

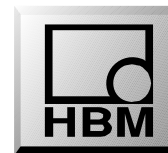
$$\sigma_{1/2} = \frac{190\,000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{1-0,25} \cdot \frac{-47,1 \cdot 10^{-6} + 175,7 \cdot 10^{-6}}{2} \pm \frac{190\,000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{\sqrt{2}(1+0,25)}$$

$$\cdot \sqrt{(-47,1 \cdot 10^{-6} - 74,1 \cdot 10^{-6})^2 + (175,7 \cdot 10^{-6} - 74,1 \cdot 10^{-6})^2}$$

$$\underline{\underline{\sigma_1 = 33,2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}}$$

$$\underline{\underline{\sigma_2 = -0,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}}$$

Dvoosno naponsko stanje sa nepoznatim pravcima glavnih naponan



$$\psi = \arctan \frac{2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c}{\varepsilon_a - \varepsilon_c} \quad \left| \begin{array}{l} Z \\ N \end{array} \right.$$

Važi samo za 0°/45°/90° - rozete!

$$\left. \begin{array}{l} Z \geq 0 (+) \\ N > 0 (+) \end{array} \right\} \varphi = \frac{1}{2}(0^\circ + |\psi|)$$

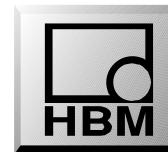
$$\left. \begin{array}{l} Z > 0 (+) \\ N \leq 0 (-) \end{array} \right\} \varphi = \frac{1}{2}(180^\circ - |\psi|)$$

$$\left. \begin{array}{l} Z \leq 0 (-) \\ N < 0 (-) \end{array} \right\} \varphi = \frac{1}{2}(180^\circ + |\psi|)$$

$$\left. \begin{array}{l} Z < 0 (-) \\ N \geq 0 (+) \end{array} \right\} \varphi = \frac{1}{2}(360^\circ - |\psi|)$$

Problem: Višeznačnost tangensa!!

Dvoosno naponsko stanje sa **nepoznatim** pravcima glavnih naponan



$$\psi = \arctan \frac{2\varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c}{\varepsilon_a - \varepsilon_c}$$

Ψ : Pomoćni ugao

$$\psi = \arctan \frac{2 \cdot 74,1 \cdot 10^{-6} - (-47,1 \cdot 10^{-6}) - 175,7 \cdot 10^{-6}}{-47,1 \cdot 10^{-6} - 175,7 \cdot 10^{-6}}$$

$$\psi = \arctan \frac{19,6 \cdot 10^{-6}}{-222,8 \cdot 10^{-6}}$$

$> 0 (+)$

$\leq 0 (-)$

$$\psi = -5,03$$

Dvoosno naponsko stanje sa **nepoznatim** pravcima glavnih naponan

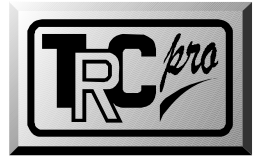
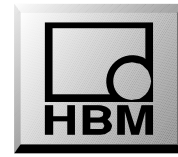
$$\left. \begin{array}{l} Z \geq 0 (+) \\ N > 0 (+) \end{array} \right\} \varphi = \frac{1}{2} (0^\circ + |\psi|)$$

$$\left. \begin{array}{l} Z > 0 (+) \\ N \leq 0 (-) \end{array} \right\} \varphi = \frac{1}{2} (180^\circ - |\psi|)$$

$$\left. \begin{array}{l} Z \leq 0 (-) \\ N < 0 (-) \end{array} \right\} \varphi = \frac{1}{2} (180^\circ + |\psi|)$$

$$\left. \begin{array}{l} Z < 0 (-) \\ N \geq 0 (+) \end{array} \right\} \varphi = \frac{1}{2} (360^\circ - |\psi|)$$

Dvoosno naponsko stanje sa **nepoznatim** pravcima glavnih naponan



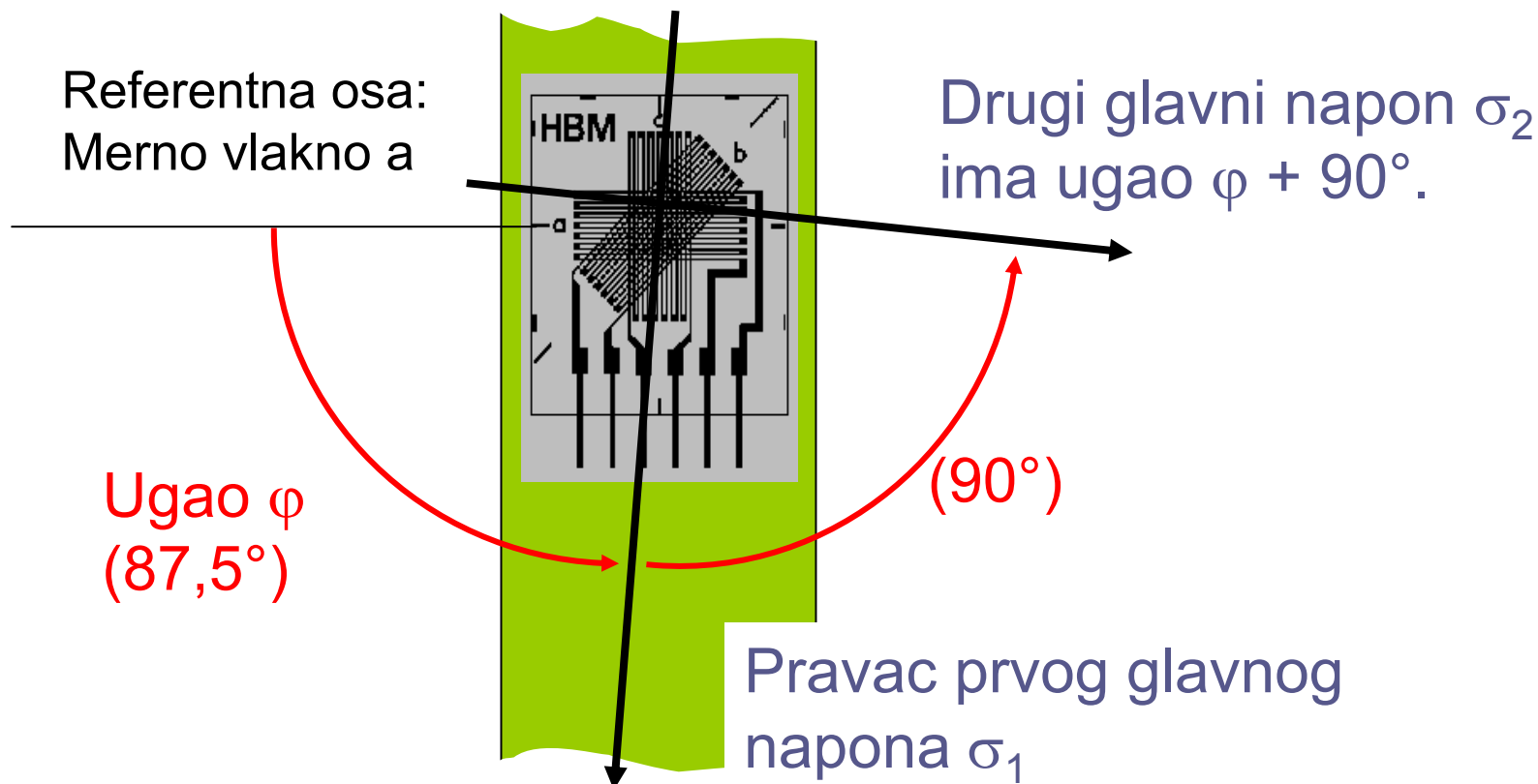
$$\left. \begin{array}{l} Z > 0 (+) \\ N \leq 0 (-) \end{array} \right\} \varphi = \frac{1}{2}(180^\circ - |\psi|)$$

$$\varphi = \frac{1}{2}(180^\circ - |\psi|)$$

$$\varphi = \frac{1}{2}(180^\circ - 5,03^\circ)$$

$$\underline{\underline{\varphi \approx 87,5^\circ}}$$

Dvoosno naponsko stanje sa nepoznatim pravcima glavnih naponan



Merenje sa rozetom 0°/60°/120°

$$\sigma_{1/2} = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{3} \pm \frac{E}{1+\nu} \cdot \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c}{3}\right)^2 + \frac{1}{3}(\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2}$$

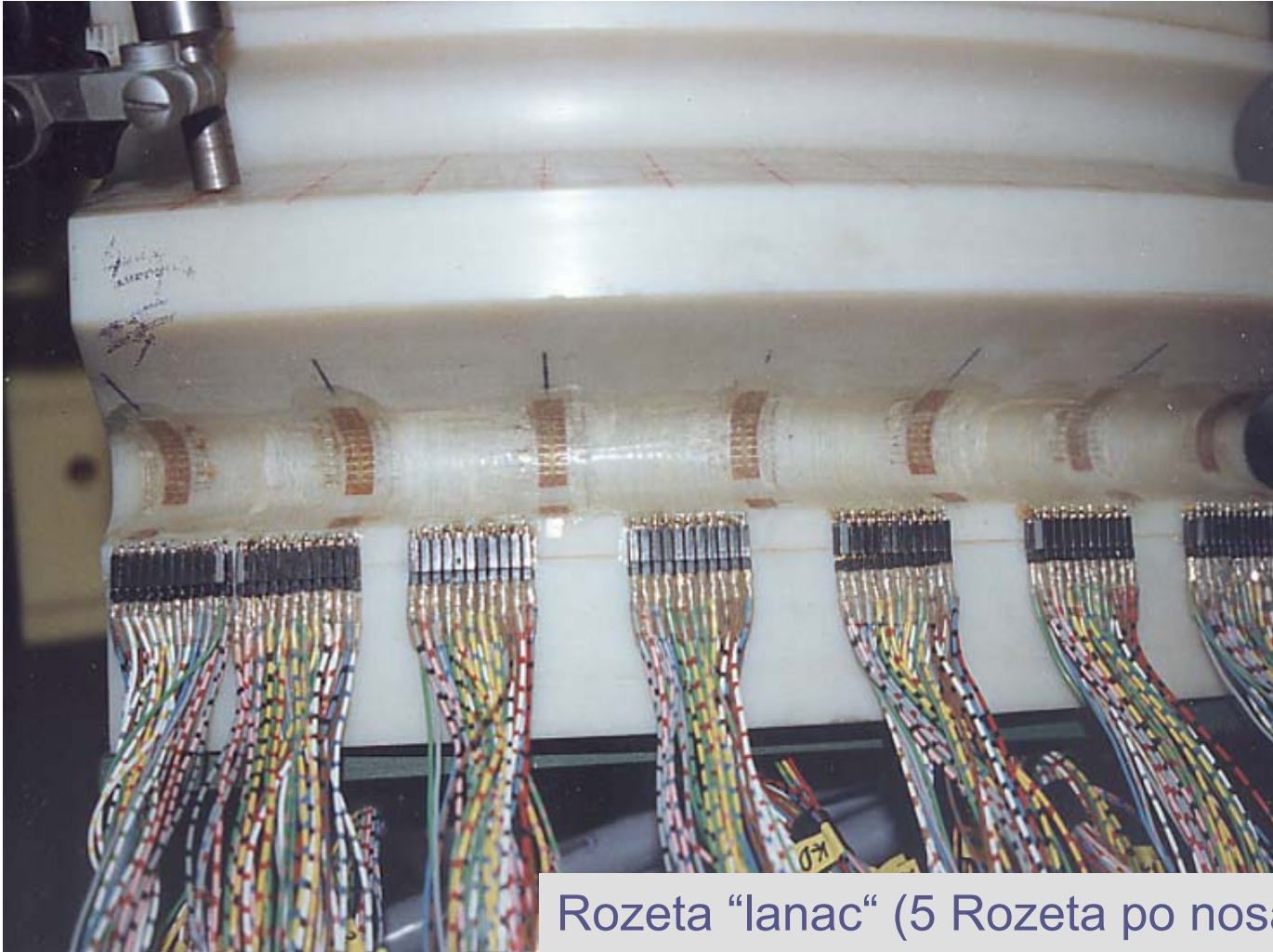
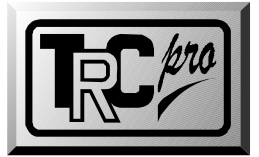
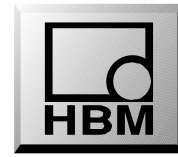
$$\psi = \arctan \frac{\sqrt{3}(\varepsilon_b - \varepsilon_c)}{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c} \quad \left| \frac{Z}{N} \right.$$

Dvoosno naponsko stanje sa **nepoznatim** pravcima glavnih naponan



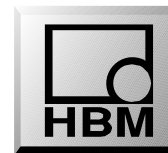
Tip za instalaciju:
Postavljanje rozete
(vlakno a) paralelno ili
normalno prema
markantnim delovima
(Ivice, granice, ili sl.)

Dvoosno naponsko stanje sa **nepoznatim** pravcima glavnih naponan



Rozeta “lanac” (5 Rozeta po nosaču):
Ko da to računa “ručno”?

Dvoosno naponsko stanje sa **nepoznatim** pravcima glavnih naponan



Spannungsanalyse durchführen

Standardrosetten | Spezielle Rosettenverfahren | Temperaturkompensation

Rosetten-Typ

45/90 Grad

60/120 Grad

Zweiachsiger, bekannter planarer Spannungszustand

Vergleichsspannung nach v. Mises berechnen

Querempfindlichkeit der Einzel-DMS berücksichtigen (%)

0,1 Gitter a 0 Gitter b 0

Dehnung a: DB1 Zeitbasis

Dehnung b: DB2 Kanal 2

Dehnung c:

N/mm²

Materialtabelle...

Ergebniskanäle

Beginnen bei: DB1 Zeitbasis

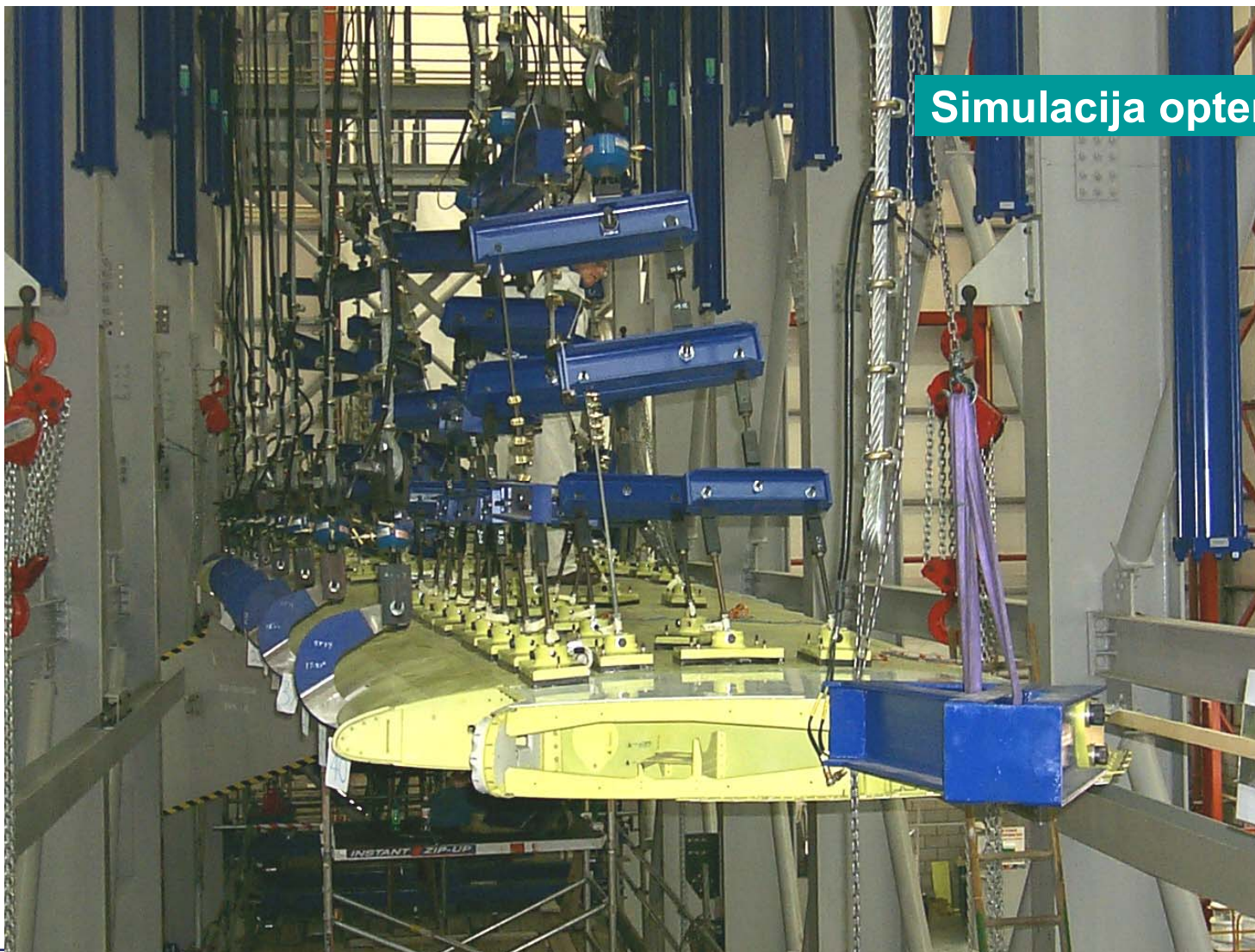
nr	name
1	Orientierungswinkel
2	Hauptnormalspannung 1
3	Hauptnormalspannung 2

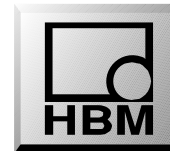
Hilfe In Auto Command Liste übernehmen OK Abbrechen

Software



Simulacija opterećenja



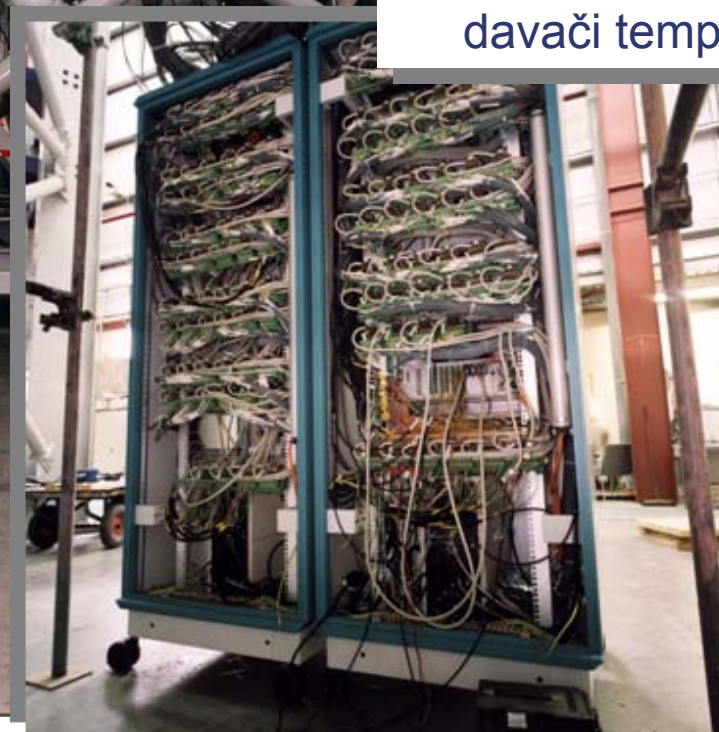


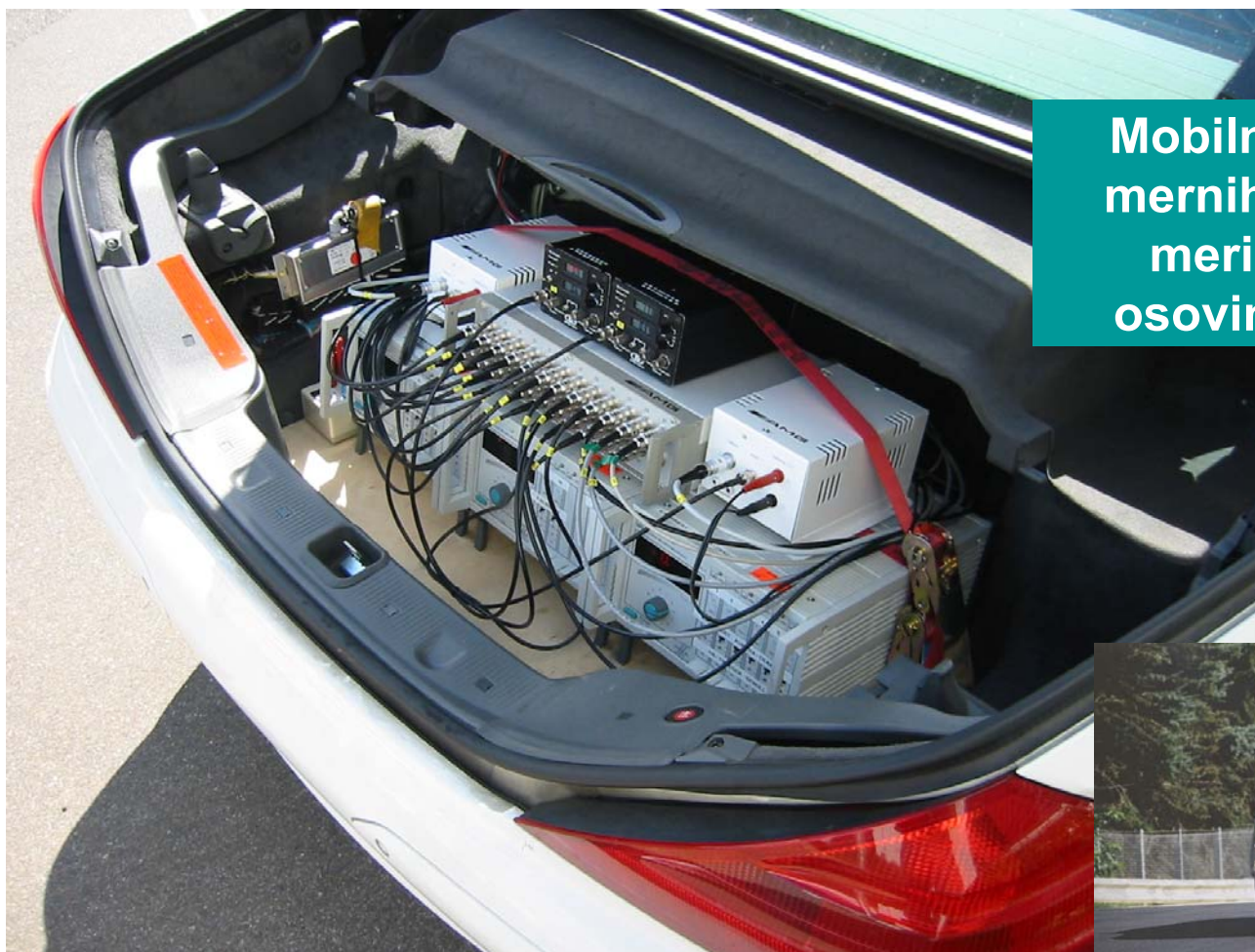
1000 Mernih kanala

800 mernih traka

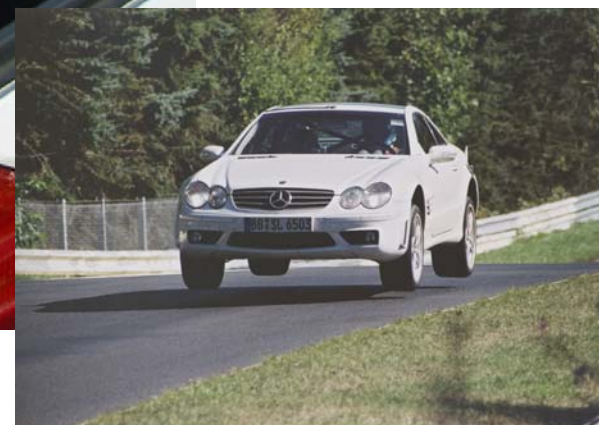
28 davača sile

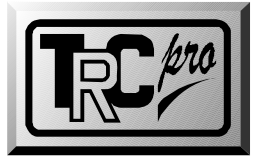
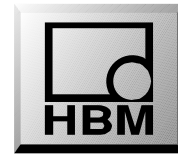
52 induktivnih davača hoda
davači temperature





**Mobilna akvizicija
mernih veličina sa
merih traka na
osovinama vozila**



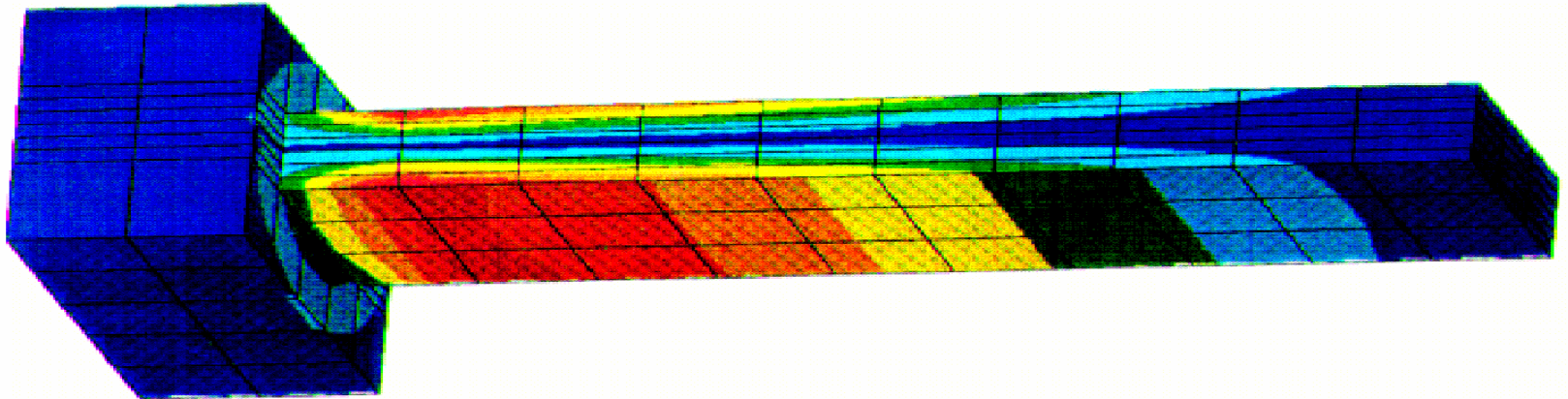


Troosno (prostorno) naponsko stanje

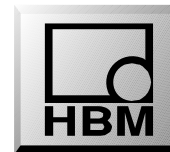
Nedostatak: Merne trake ne mogu meriti napone u materijalu...

ALI....

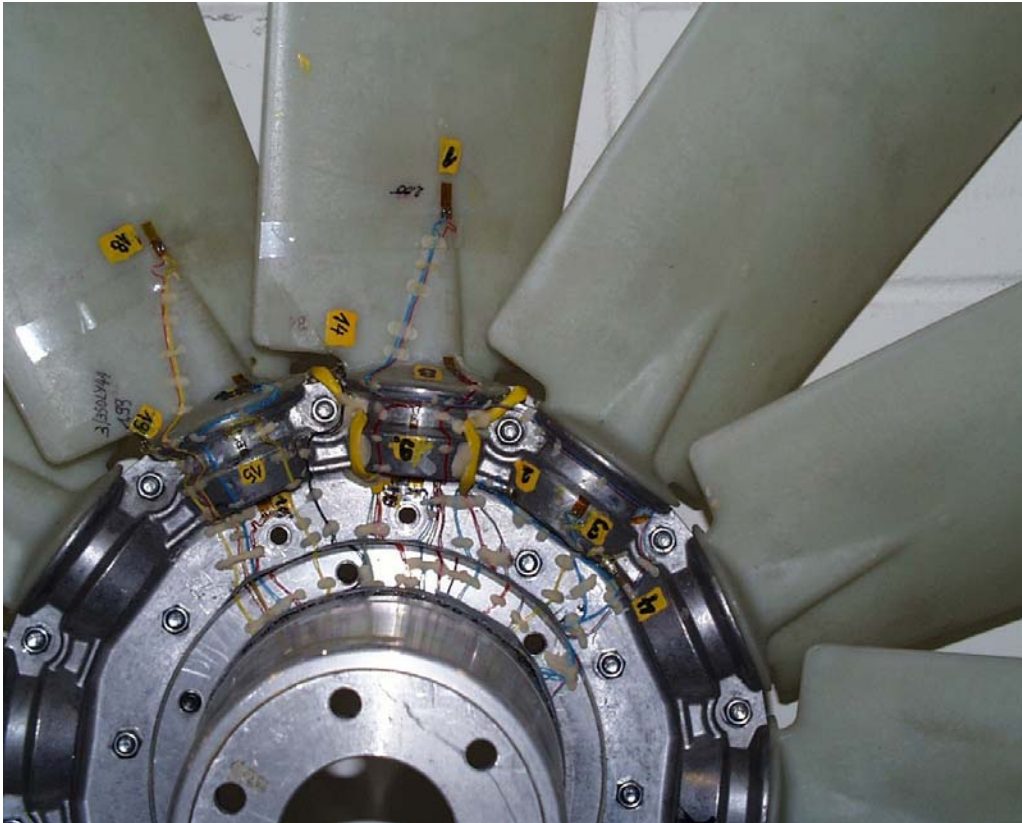
U trodimenzionalnom - prosornom telu pod opterećenjem, maksimalni naponi (oni koji su sa aspekta konstrukcije najznačajniji) uvek pojavljuju na površini tela.



Nedostatak nije relevantan



Zaostali naponi Temperaturni naponi



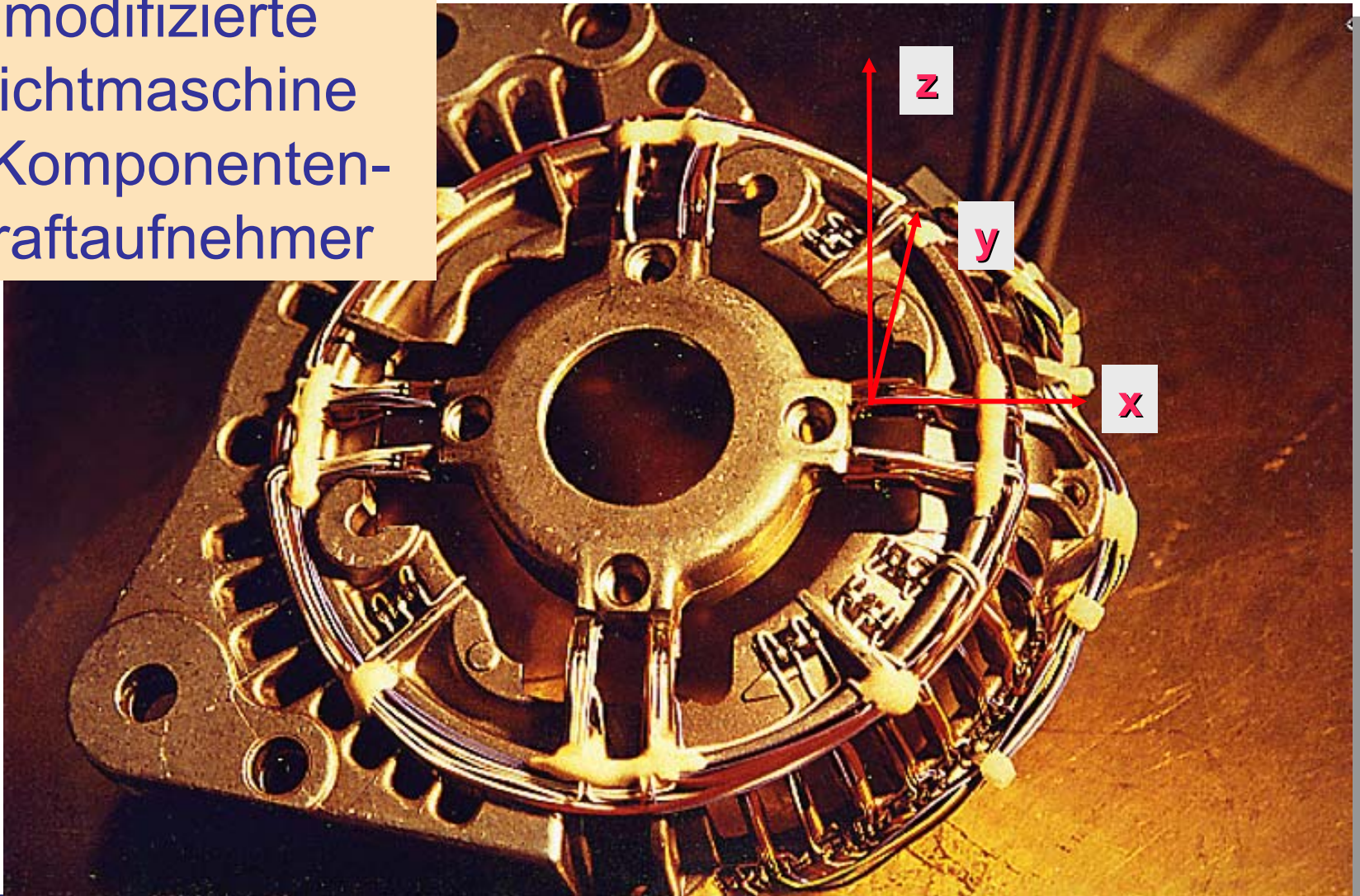
**DMS-Instalacija na ventilatoru
Fa. MAN – teretni program**

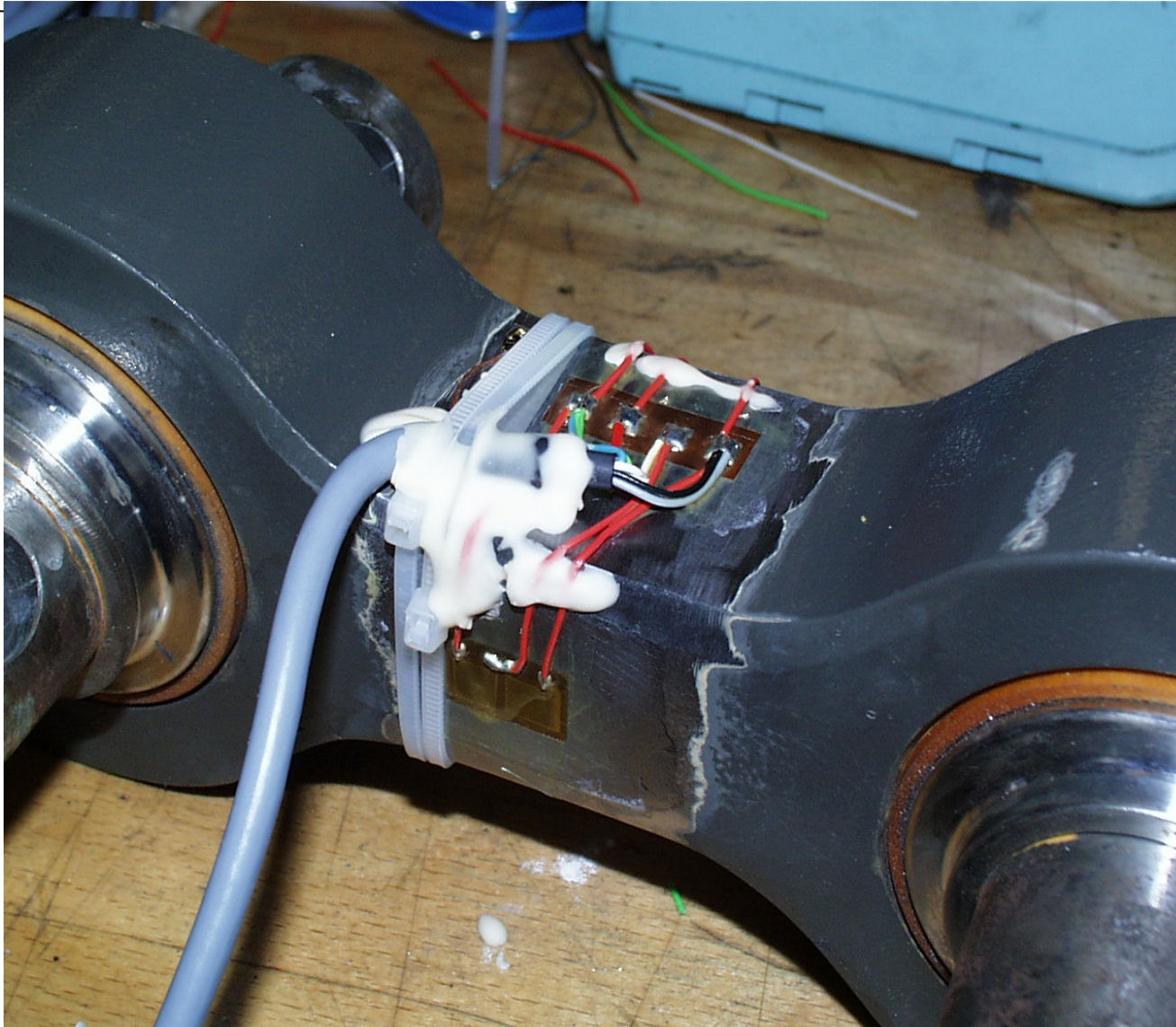




Merenje opterećenja na pedali vozila

modifizierte
Lichtmaschine
3-Komponenten-
Kraftaufnehmer

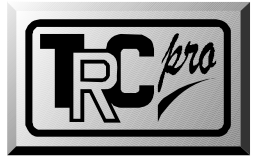
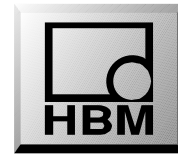




**Applikacija na
elementima za
vođenje kod
šinskog vozila**



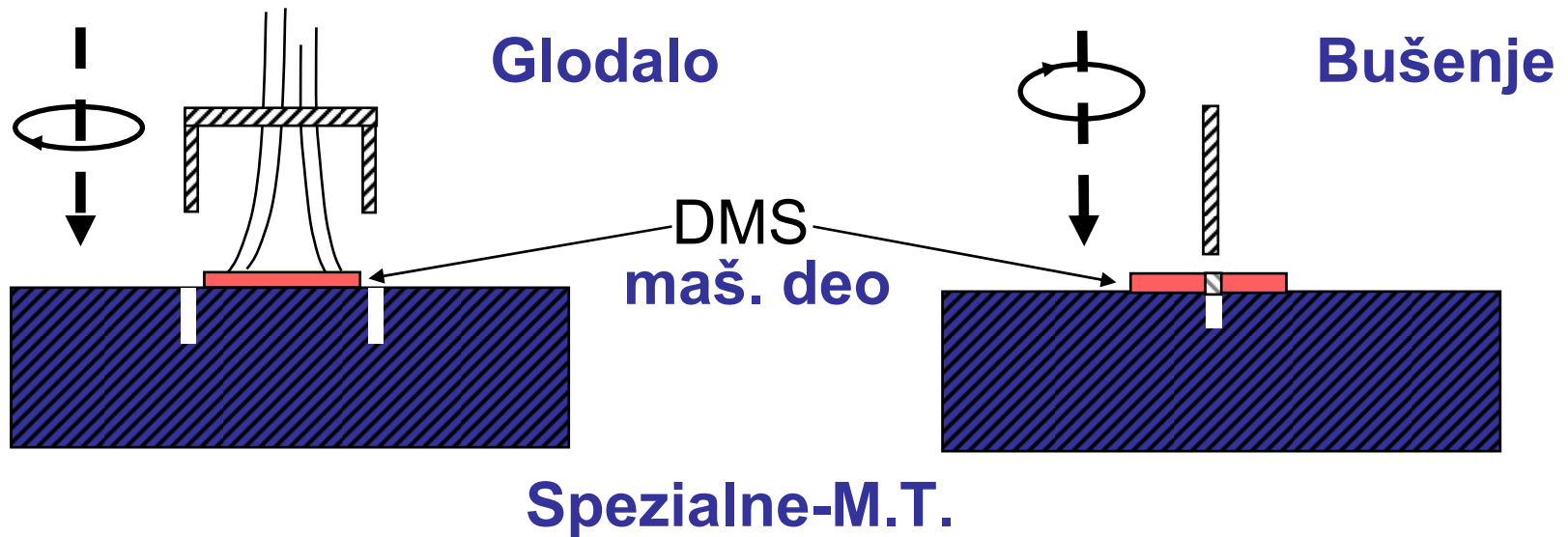
Merenje sila uležištenja kod kotrljajnog ležaja



ZAOSTALI NAPONI

Nastaju kao posledica **delovanja unutrašnjih sila** u materijalu (bez dejstva spoljašnjih sila)

- Neravnomerno hlađenje odливaka
- Na zavarima
- Od mehaničke obrade (kovanje, provlačenje...)
- **Rezultat: Pojava normalnih- i tangencijalnih napona u materijalu**

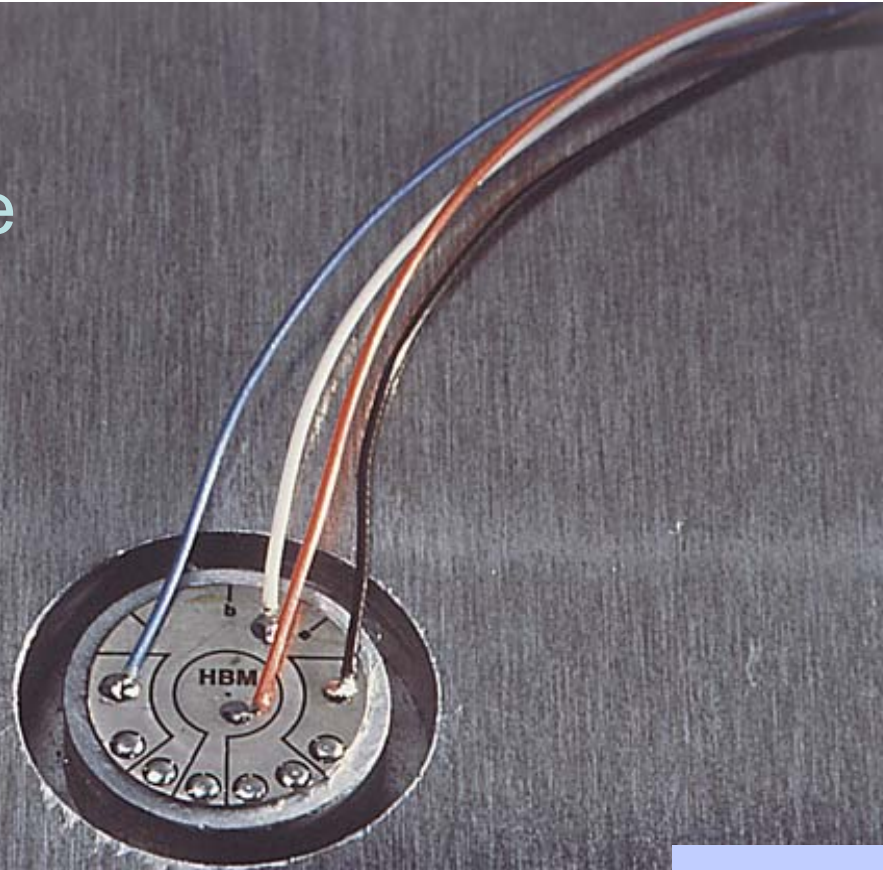


**Postupak glodanja žljeba
~ 4 ...5 mm dubina**

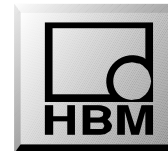
**Metoda zabušivanja
~8 mm dubina**

Posmak glodanja odn. bušenja u 1/100mm-koracima

Glodanje
žljeba



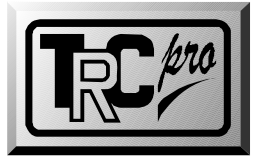
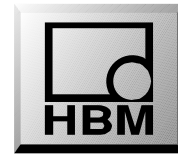
Određivanje
zaostalih napona



Određivanje zaostalih napona

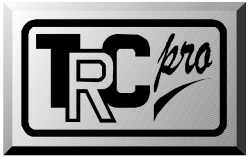
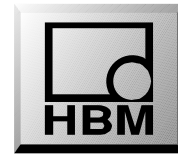
Mtoda
zabušivanja



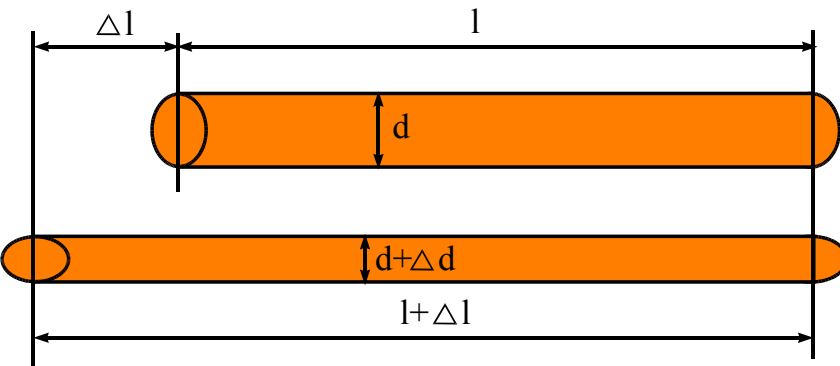


FIZIKALNI PRINCIP DELOVANJA MERNE TRAKE

Princip rada merne trake



Merna traka je provodnik definisane otpornosti koji je pričvršćen za površinu mernog objekta. Svaka deformacija mernog objekta usled njegovog opterećenja izaziva odgovarajuću deformaciju merne trake što sve zajedno omogućuje merenje promene otpora merne trake.



U neopterećenom stanju: el. otpor R_0

U opterećenom stanju: el. otpor $R_0 + \Delta R$

R -Električni otpor

F -Površina poprečnog preseka

V -Zapremina otpornika

R_0 -Početni el. otpor

$\Delta l/l$ -Deformacija: ε

$$R_0 = \frac{\rho l}{F} = \frac{\rho l^4}{\pi d^2} = \frac{\rho l^2}{V}$$

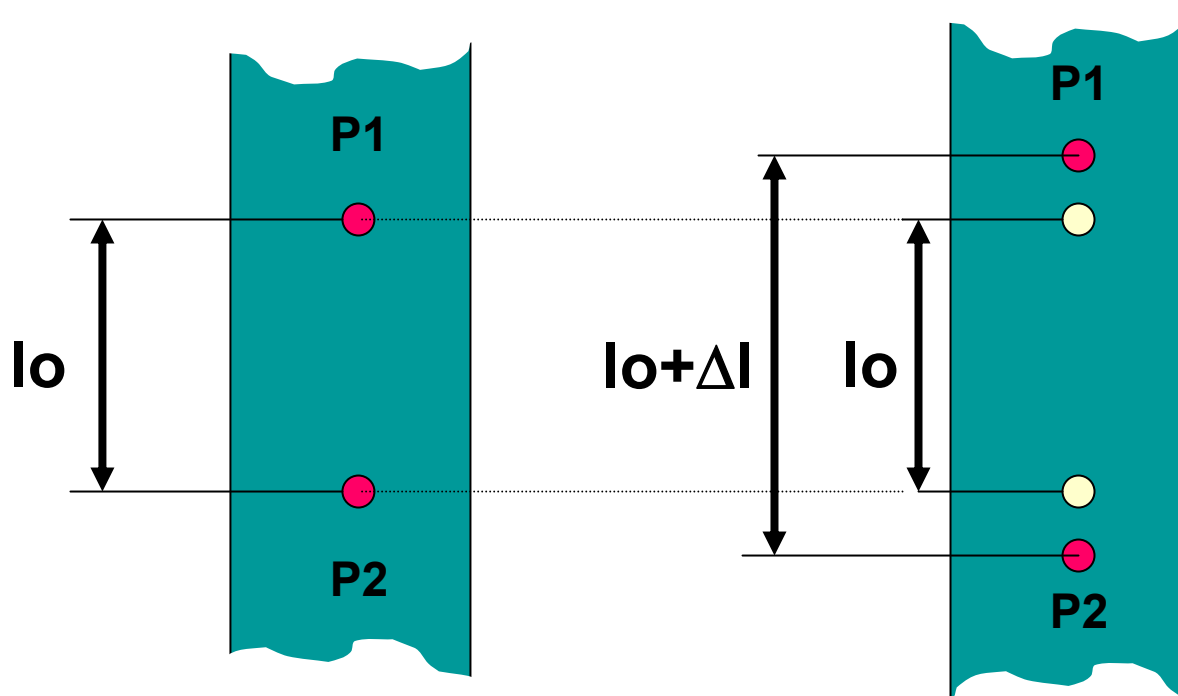
Promena otpora usled deformacije i promena u mikrostrukturi je data kao:

$$\frac{dR}{R_0} = \varepsilon(1 + \mu) + \frac{d\rho}{\rho}$$

I mikrostruktura
II geometrija

Pojam dilatacije ε

Opisuje translatornu promenu oblika materije



$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

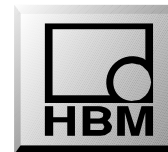
Merna jedinica: u “dnevnom govoru” ‰

bolje: mm/m ili $\mu\text{m}/\text{m}$

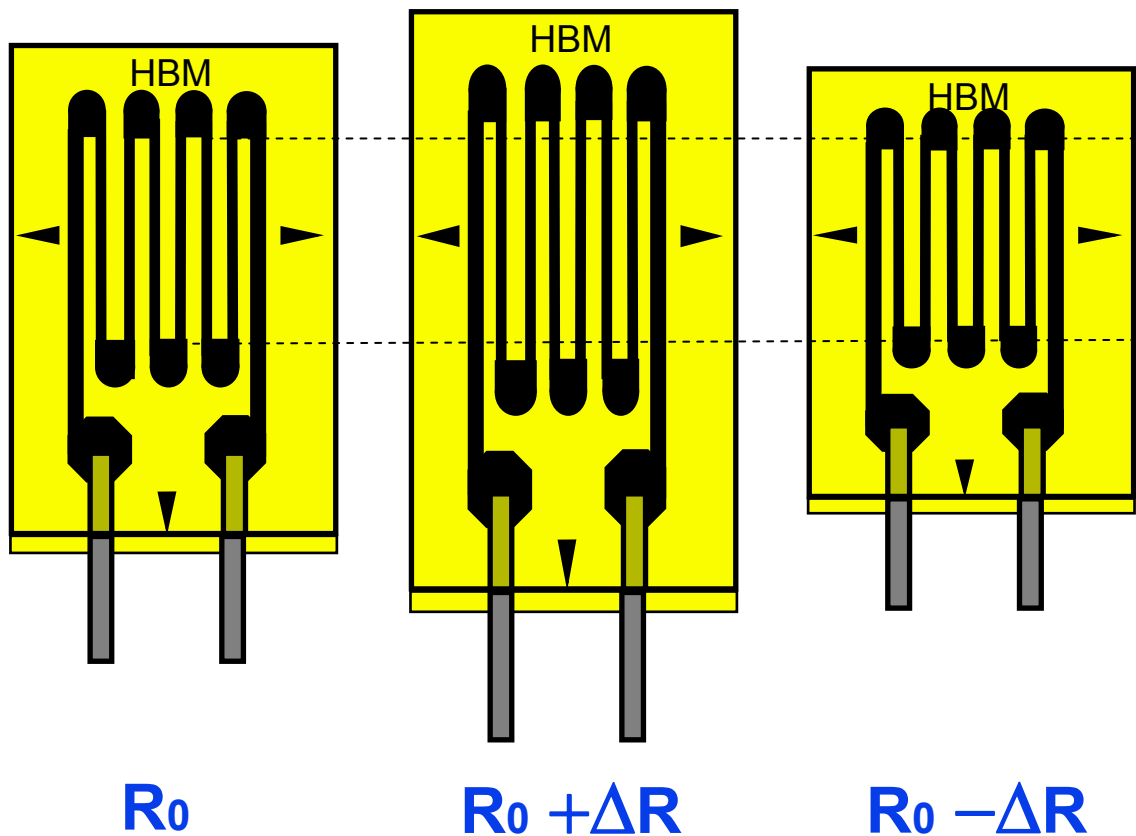
Razlozi:

- mehaničko Opterećenje
- temperaturne promene
- oslobođeni zaostali naponi

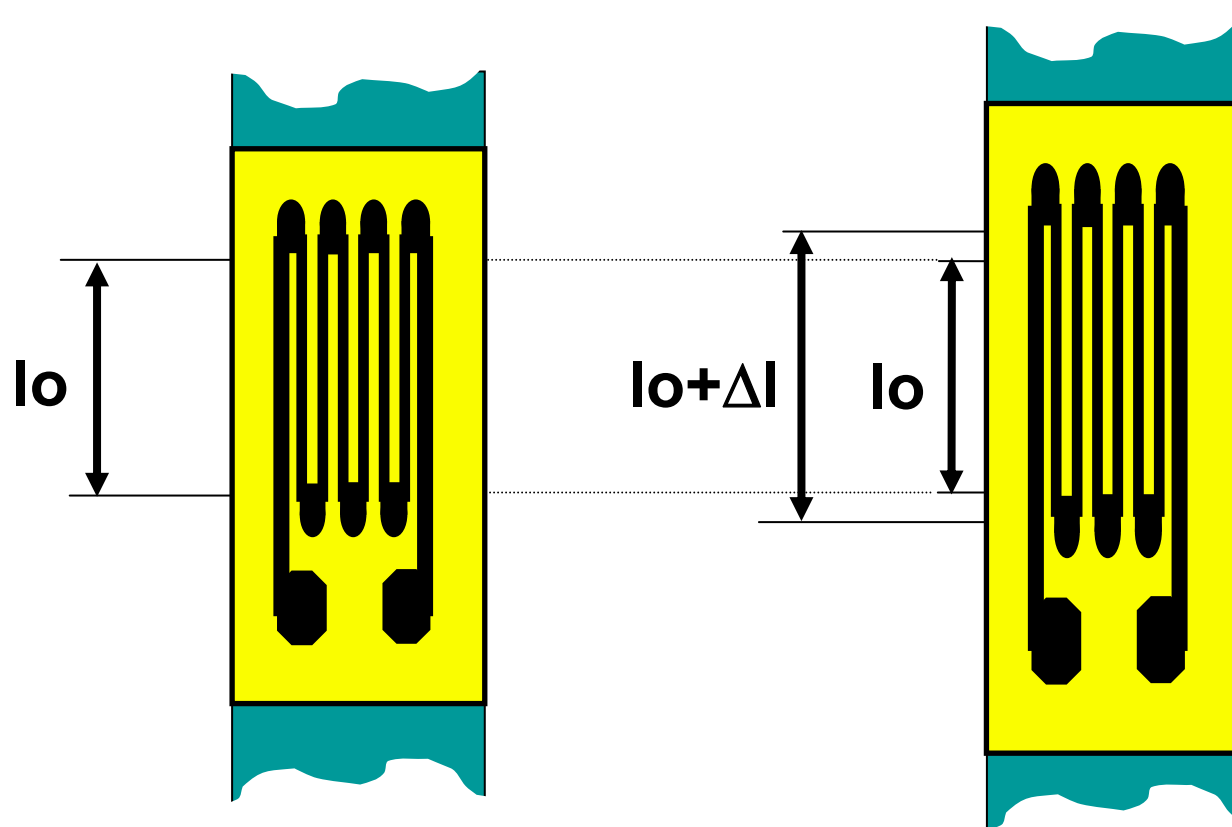
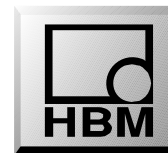
Princip rada merne trake



Šematski prikaz !



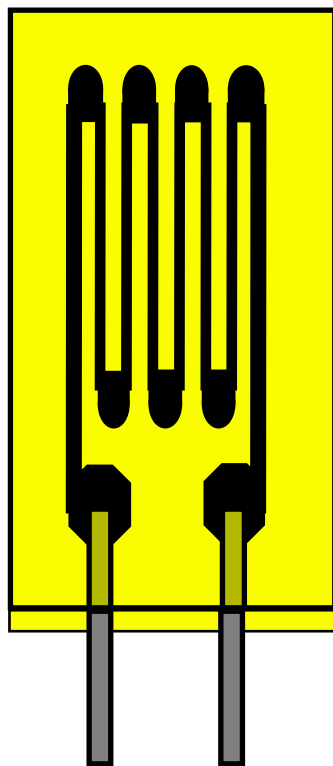
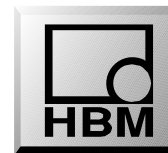
Princip rada merne trake



$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta R/R_0}{k}$$

Princip rada merne trake



$R_0 + \Delta R$

$$\varepsilon = \frac{\Delta R/R_0}{k}$$

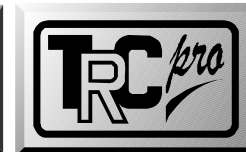
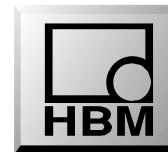
$$\Delta R/R_0 = \Delta \rho/\rho_0 + \Delta l/l_0 - \Delta A/A_0$$

Specifična promena otpornosti
usled promene volumena

Specifična promena otpornosti
usled promene geometrije

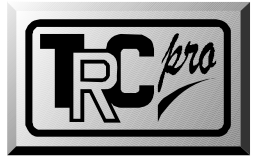
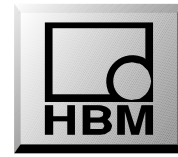
Fizikalni principi mernih traka

- *Mehaničke merne trake (DMS)*
- *Optičke merne trake (DMS)*
- *Kapazitivne merne trake (DMS) (primena kod visokih temperatura, ...)*
- *Piezoelektrične merne trake (DMS)*
- *Naparene merne trake (DMS) (tankoslojne)*



- **Poluprovodničke M.T.**
- **Visok izlazni signal**
- **(k~180)**
- Loša linearnost
- Visoka greška od temperature
- Komplikovano rukovanje
- Mali izbor tipova
-

- **Metalfolijske M.T.**
- **Mali izlazni signal**
- **(k~2)**
- **(pridanašnjim pojačivačima ne predstavlja više nedostatak)**
- **PREDNOSTI.....!**



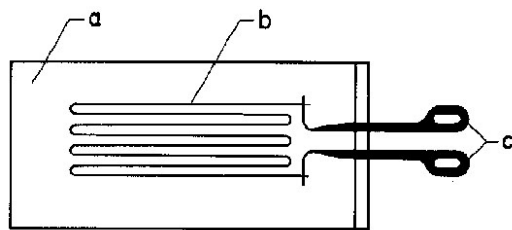
KRITERIJI ZA SELEKCIJU MERNIH TRAKA

Kriteriji za selekciju mernih traka

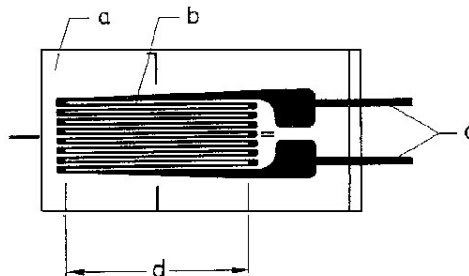


Konstrukcija

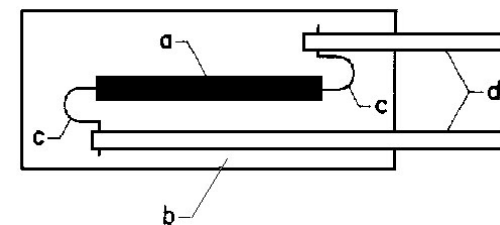
Žičane merne trake



M. t. sa met. folijom



Poluprovodničke m. t.



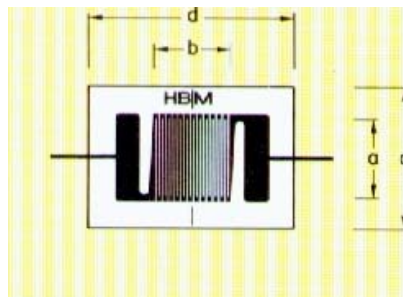
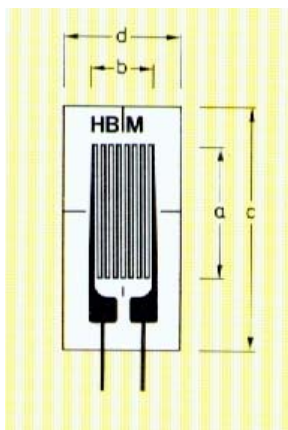
debljina žice: 15-25 μ

debljina folije: 3-5 μ

Oblik i veličina

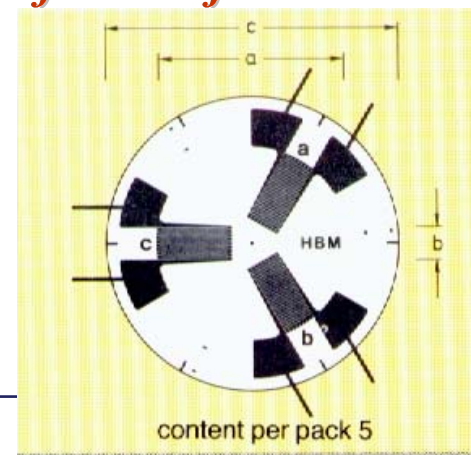
Linearne merne trake

(merenje deformacije u jednom pravcu)

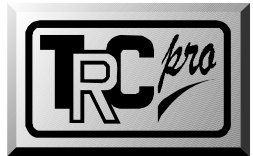
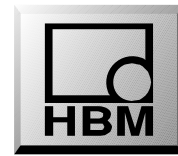


Rozete

(merenje deformacije u dva ili tri pravca)



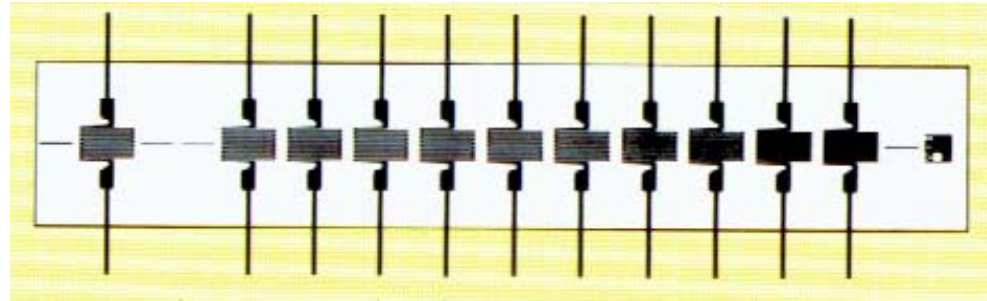
Kriteriji za selekciju mernih traka



Oblik i veličina

Lanac mernih traka

(za određivanje gradijenata napona)



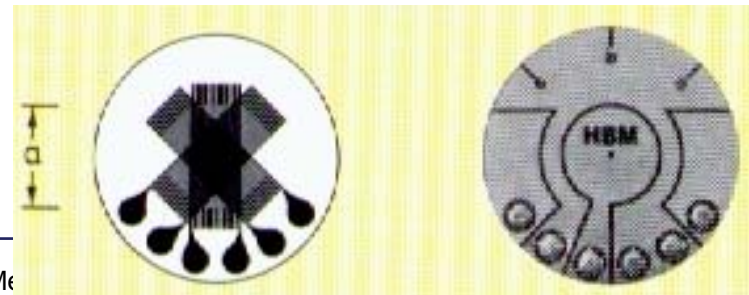
Membranske rozete

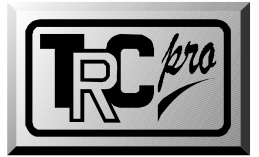
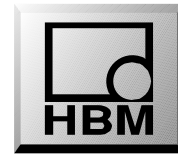
(za merenje napona u membranama)



Rezidualne naponske rozete

(za određivanje rezidualnih napona)

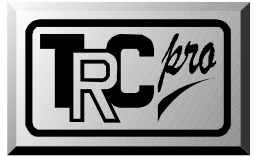
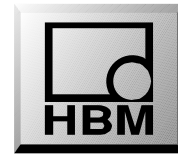




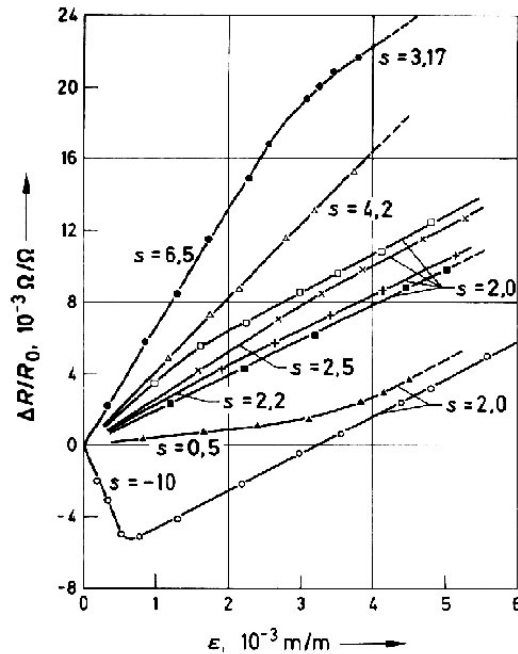
TEHNIČKE KARAKTERISTIKE MERNIH TRAKA

Tehničke karakteristike m. t.

Osetljivost merne trake (k-faktor)



Zavisnost između mehaničke deformacije i promene otpora za različite provodničke materijale:



$$S = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l}$$

- Platinum-iridium 5/95
- △ Steel wire, spring steel (piano wire)
- "Eureka"
- x "Brightray C", hard
- + "Brightray C", annealed
- Soft iron
- ▲ "Manganin"
- Nickel "O"

Osetljivost merne trake se izražava kao

$$k = \frac{\Delta R / R_0}{\Delta l / l_0} = \frac{\Delta R / R_0}{\varepsilon}$$

k-faktor

Tehničke karakteristike m. t.

Osetljivost merne trake (k-faktor)



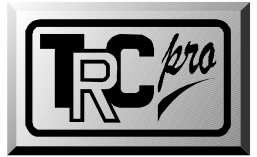
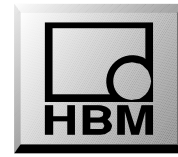
K - faktor različitih legura koje se koriste za proizvodnju vlakna u mernoj traci:

<i>Materijal mreže u mernoj traci (komercijalna imena)</i>	<i>% učešće u leguri</i>	<i>k- faktor</i>
Constantan	57 Cu, 43 Ni	2.05
Karma	73 Ni, 20 Cr, ostalo Fe+Al	2.1
Nichrom V	80 Ni, 20 Cr.	2.2
Platina-Volfram	92 Pt, 8 W	4

Za merne trake od konstantana nelinerarna karakteristika se javlja u oblasti velikih deformacija iznad $150000 \mu\text{m}/\text{m}=15 \text{ cm}/\text{m}$.

Tehničke karakteristike m. t.

Poprečna osetljivost



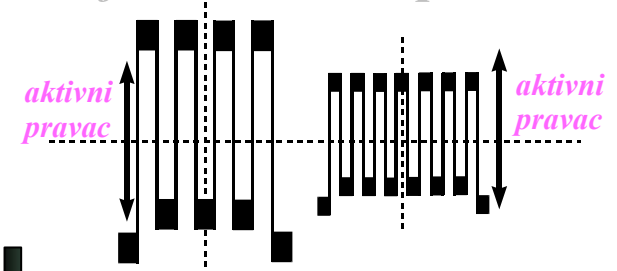
➤ Merna traka bi trebala da menja otpor samo usled naprezanja u aktivnom pravcu (pravac u kome se vrši merenje).

➤ Ako je merna traka opterećena u svom aktivnom pravcu, tada je k -faktor definisan kao

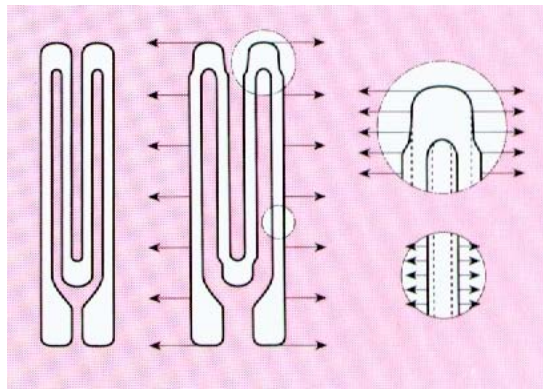
$$k_l = \frac{\Delta R / R_0}{\varepsilon_l}$$

➤ Ako je merna traka opterećena u poprečnom pravcu, tada je odgovarajući k -faktor definisan kao

$$k_t = \frac{\Delta R / R_0}{\varepsilon_t}$$



$$q = \frac{k_t}{k_l} \text{ Poprečna osetljivost}$$



Ovaj se efekat redukuje promenom folijskih mernih traka sa transverzalnim podebljanjima mreže.

Zavisno od tipa merne trake i dužine mreže merne trake, poprečna osetljivost je $q < 0.01-0.02$.

Faktori koji utiču na temperaturni odziv ε_θ

Termičko širenje materijala komponente α_c

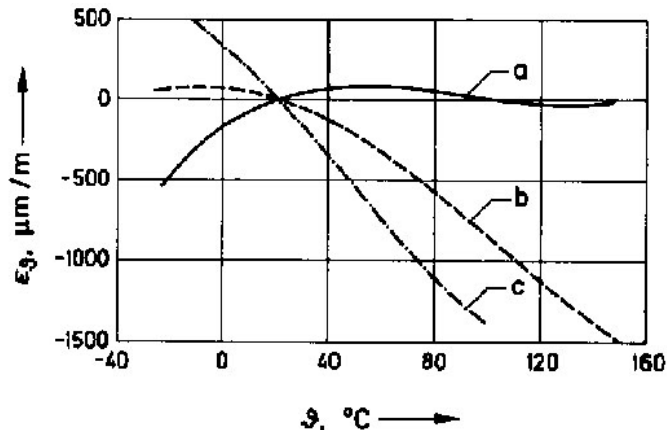
Termičko širenje samog vlakna merne trake α_M

Temperaturna promena el. otpora materijala vlakna merne trake α_R

Temperaturni odziv merne trake se računa kao

$$\varepsilon_\theta = \left(\frac{\alpha_R}{k} + \alpha_c - \alpha_M \right) \cdot \Delta\theta$$

Ako su merne trake sa identičnim parametrima postavljene na merne objekte koji imaju različite α_c , tada se dobijaju različite krive ε_θ :



a) Aluminijum $\alpha_c = 23 \cdot 10^{-6} / K$

b) Čelik $\alpha_c = 12 \cdot 10^{-6} / K$

c) Kvarc $\alpha_c = 0.5 \cdot 10^{-6} / K$

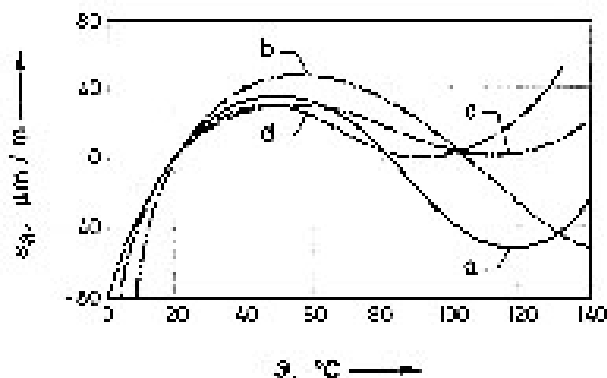


Korišćenjem specijalnih tehnologija moguće je menjati temperaturni koeficijent električne otpornosti materijala vlakna merne trake.

Koeficijent α_R mora biti prilagođen tako da važi sledeće:

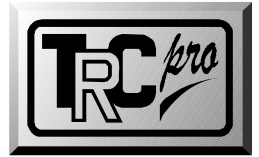
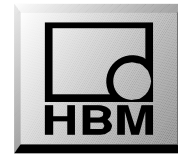
$$\alpha_R = (\alpha_M - \alpha_C) \cdot k$$

Potpuna kompenzacija nije ostvarljiva usled prisustva nelinearnih članova, tako da se dobija



Materijal	α_C
Titanijum Ti6Al4V	$8.5 \cdot 10^{-6} / K$
Feritni čelik	$12 \cdot 10^{-6} / K$
Austenitni čelik	$16 \cdot 10^{-6} / K$
Aluminijum AlCuMg ₂	$23 \cdot 10^{-6} / K$

Ovaj vid kompenzacije uvek odgovara specifičnom materijalu i odgovara-rajućem temperaturnom rangu (naznačeno na pakovanju mernih traka).



Granična frekvencija

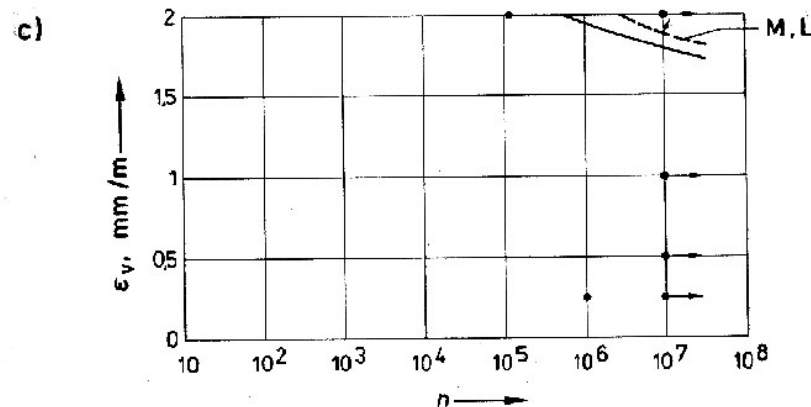
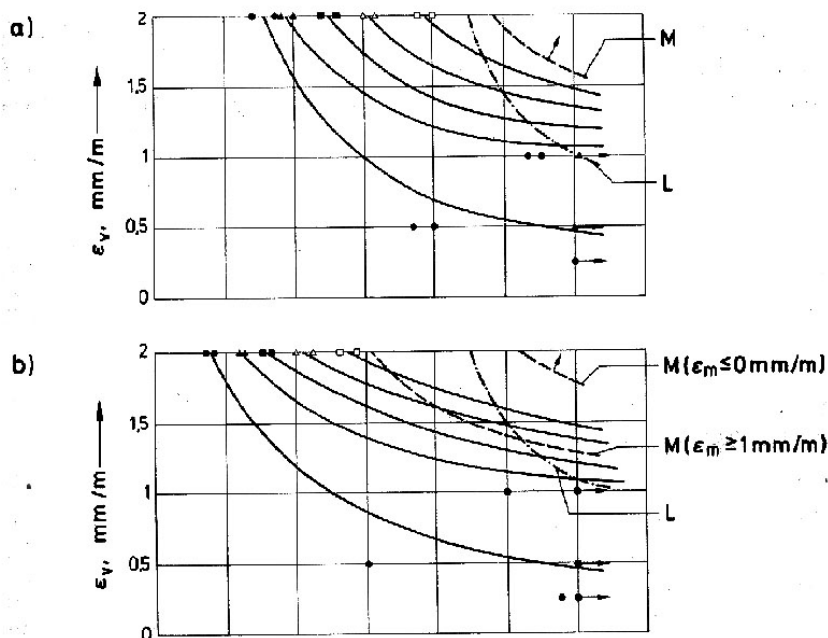
Merne trake pokazuju odlične karakteristike pri različitim dinamičkim merenjima.

- ☞ Veoma mala masa, nepostojanje inercijalni sila,***
- ☞ Ne utiču na objekat ispitivanja,***
- ☞ U pogledu gornje granične frekvencije ne postoje ograničenja, što znači da merne trake, u slučaju da su ispravno postavljene, prate sve dinamičke promene na objektu ispitivanja.***

Karakteristike vezane za ispitivanje na zamor

➤ Merne trake su se pokazale kao veoma pogodne za dugotrajna, dinamička ispitivanja kod velikog broja ciklusa.

➤ Vibracije doprinose povećanju električne otpornost merne trake što je vidljivo kao dinamičko “driftovanje” nule.

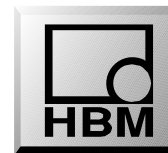


$\Delta \epsilon_m$ [$\mu\text{m/m}$]

- = 10
- ▲ = 30
- = 100
- △ = 300
- = 1000

fatigue curves:
 --- M --- (measuring grid)
 --- L --- (leads)

Tehničke karakteristike m. t. Električno opterećenje



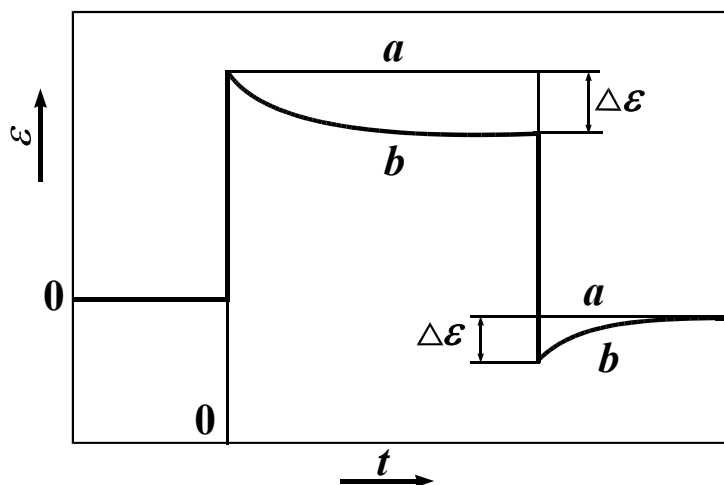
Merna traka dužine 6 mm, čija mreža ima električni otpor 120 Ω koja je priključena na simetrično mosno kolo daje struju od 20.8 mA.

Ova struja usled ekstremno malog poprečnog preseka merne trake pro-izvodi električno polje gustine 46 A/mm².

Ovo dovodi do samozagrevanja merne trake, a proizvedena toplotna energija se dalje prenosi na okruženje merne trake. Sledeći parametri imaju najveći uticaj:

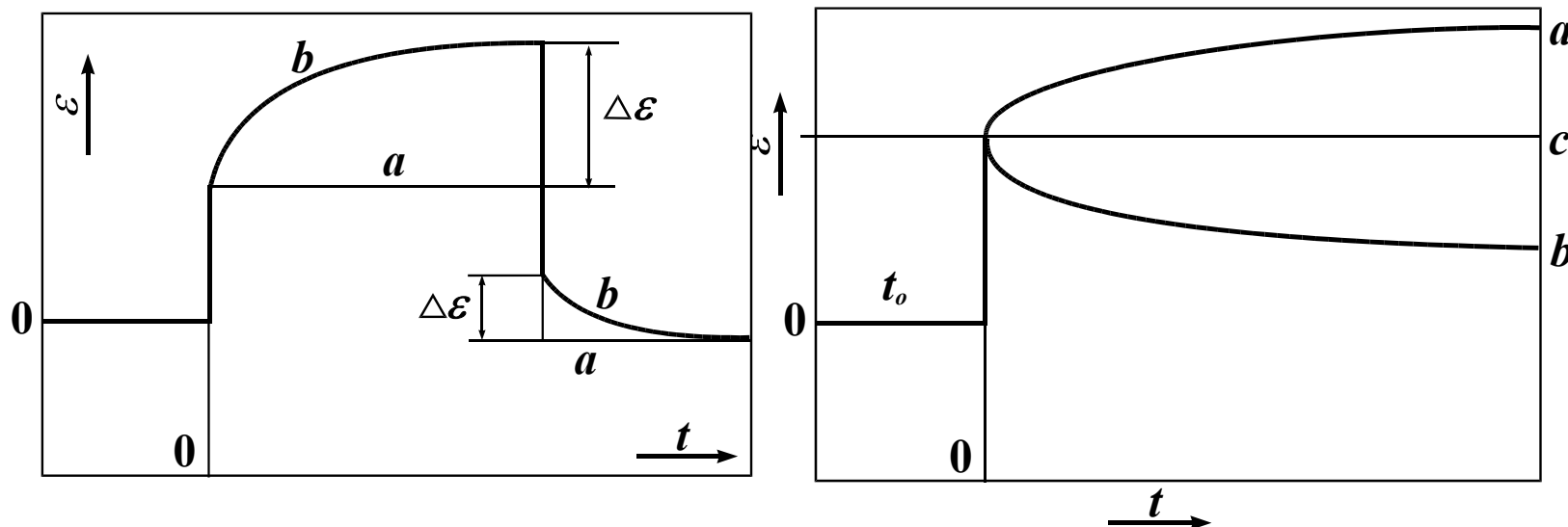
- ☞ Napajanje mosta,*
- ☞ Električni otpor mreže merne trake,*
- ☞ Veličina i geometrija mreže merne trake,*
- ☞ Temperatura okruženja,*
- ☞ Toplotna provodljivost materijala mernog objekta,*
- ☞ Toplotni kapacitet materijala mernog objekta.*

Ako je mernoj traci pridružena statička deformacija, tada se njen električni otpor menja, usprkos konstantnoj deformaciji objekta. Uzrok ove pojave treba tražiti u reološkim karakteristikama vezivnog sloja i mreže merne trake. Puzanje se javlja usled smicajnih napona i najizraženije je na krajevima merne trake.



Folijske merne trake poseduju bolja svojstva pri puzanju usled svojih širokih završetaka.

Visoko precizni merni pretvarači, bazirani na mernim trakama, koriste puzanje mernih traka radi kompenzacije tzv. “post-elastičnog” efekta.

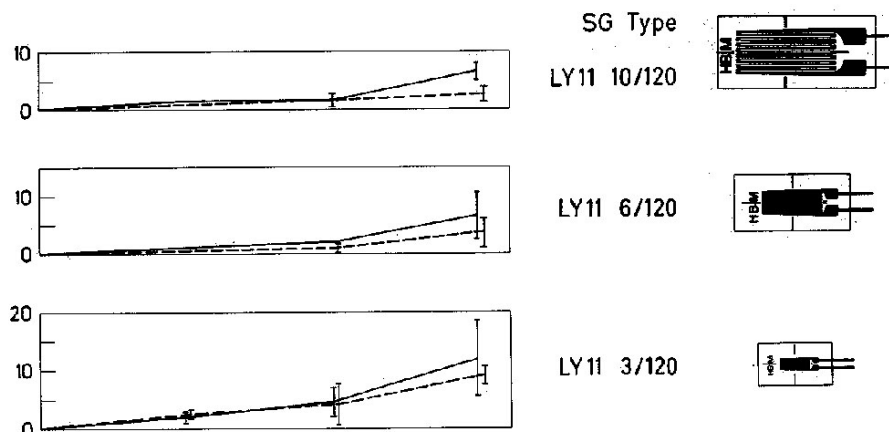
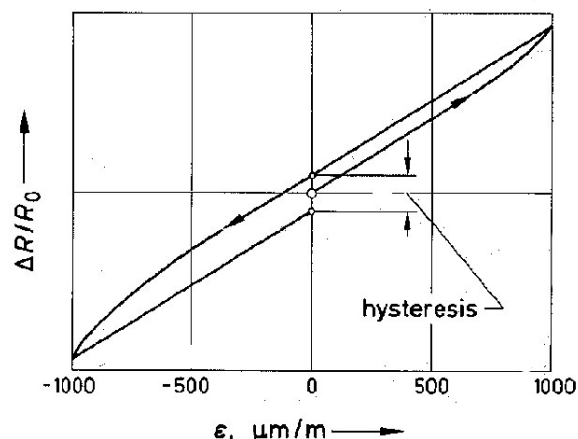


a-”Post-elastični” efekat za materijal mernog objekta

b-Puzanje merne trake

c-Izmereni signal

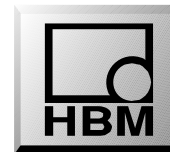
Mehanička histereza: do 0.1% pri 3000 $\mu\text{m}/\text{m}$ uključujući i vezivni materijal, zavisno od vezivnog materijala i od tipa, konstrukcije i veličine merne trake.



Vlažnost: Zaštita od vlage zahteva poštovanje odgovarajućih preporuka proizvođača merne opreme.

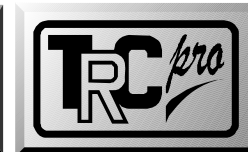
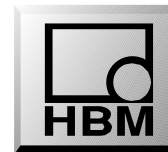
Hidrostatski pritisak: Merne trake su u stanju da izdrže hidrostatski pritisak do 10000 bara.

Vakum: Odgovarajući testovi sa mernim trakama su bez problema vršeni do 10^{-7} mbara.



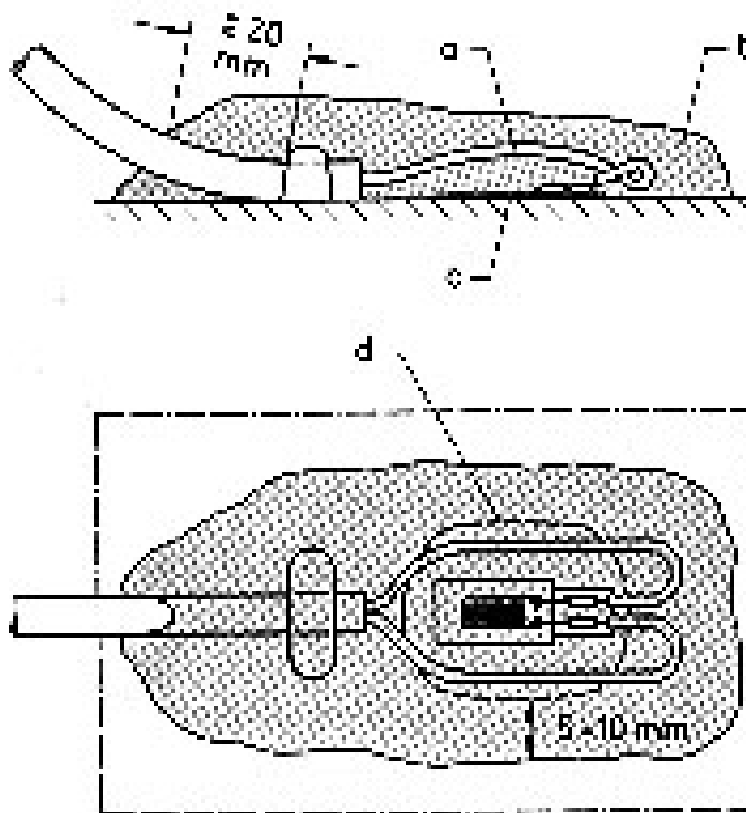
APLIKACIJA

Postavljanje merne trake na objekat ispitivanja



Vezivanje merne trake na merni objekat koje se izvodi lepljenjem, uz upotrebu različitih vezivnih materijala, zahteva maksimalnu pažnju.

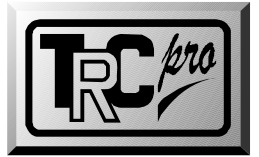
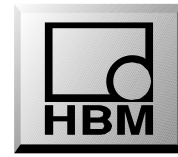
PRIMER:





Postavljanje merne trake uključuje:

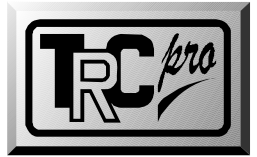
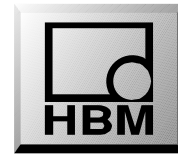
- Čišćenje (mehaničko, hemijsko)
- Vezivanje (različitim lepkovima)
- Lemljenje (kontrola temperature pomoću terminala za lemljenje)
- Provera (vizuelna, otpor izolacije)
- Zaštita (mehanička, hemijska)



ELEKTRIČNO POVEZIVANJE MERNIH TRAKA



Wheatston-ov most



Wheatston-ov most može biti upotrebljen za merenje električnog otpora:

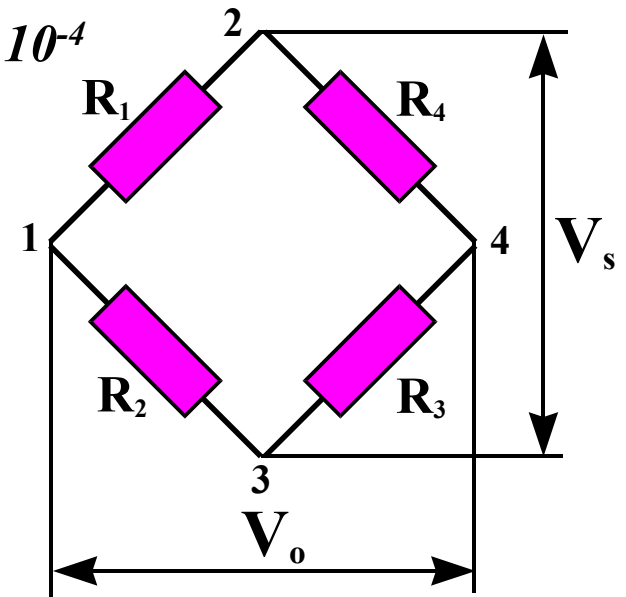
- *za merenje apsolutnog iznosa otpora, poređenjem sa poznatim otporom*
- *za merenje relativne promene električnog otpora*

Omogućava merenje promene otpora u grani-cama 10^{-4} do $10^{-7} \Omega / \Omega$ sa odličnom tačnošću.

Četiri grane mosta se formiraju od otpornika R_1 do R_4 .

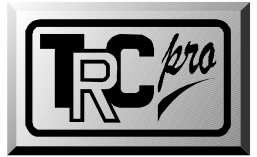
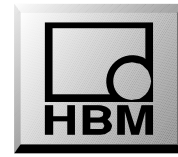
U tačkama 2 i 3 se spajaju grane za napajanje mosta V_s jednosmernim ili naizmjeničnim naponom.

U tačkama 1 i 4 se skida izlazni napon V_o koji predstavlja merni signal.

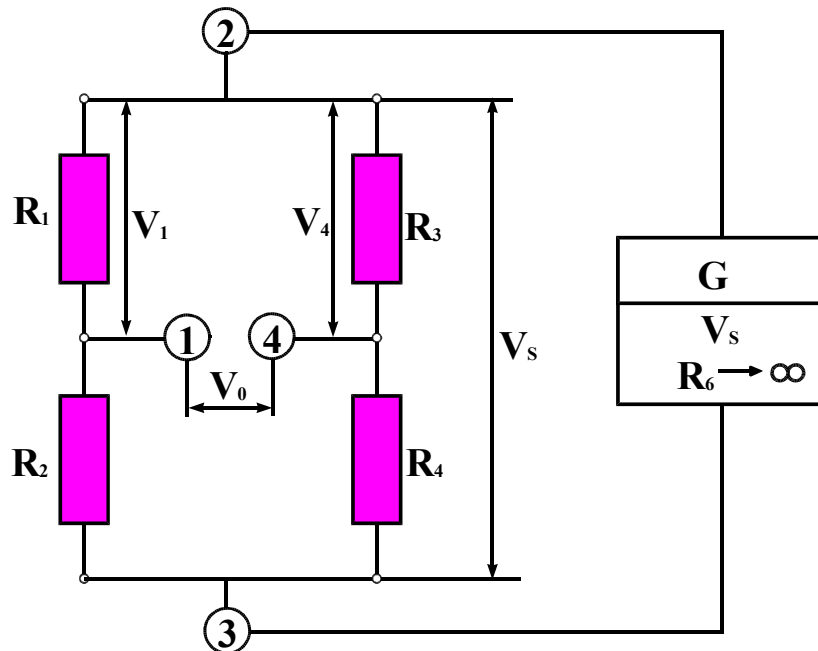


Wheatston-ov most

Princip rada



Teorija koja sledi, pretpostavlja da je otpor R_g izvora napona zanemaljiv i da je unutrašnji otpor instrumenta za izlazni napon veoma veliki.



$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_S \quad V_4 = \frac{R_4}{R_4 + R_3} \cdot V_S$$

Razlika ova dva napona predstavlja izlazni napon V_0

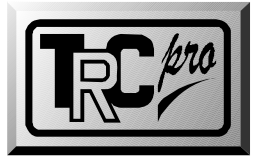
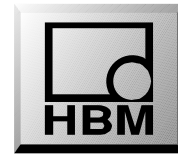
$$V_0 = V_S \cdot \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_4 + R_3} \right) = V_S \cdot (V_1 - V_4)$$

Ako je neizbalansiranost mosta defeinisana kao relativni izlazni napon V_0/V_S dobija se:

$$\frac{V_0}{V_S} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_4 + R_3}$$

Wheatston-ov most

Uslov izbalansiranosti mosta



Postoje dva slučaja kada važi $V_0=0$:

a) Otpori otpornika u mostu su jednaki: $R_1=R_2=R_3=R_4$

b) Odnos otpora u dve polovine mosta je isti: $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$

U oba ova slučaja je $V_0/V_S=0$, most je “izbalansiran”. Ako otpori u mostu $R_1\dots R_4$ menjaju svoje vrednosti za odgovarajuće ΔR , most je “u debalansu” i javlja se odgovarajući izlazni napon V_0 .

$$\frac{V_0}{V_S} = \frac{1}{4} \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_4 + \Delta R_4 + R_3 + \Delta R_3} \right)$$

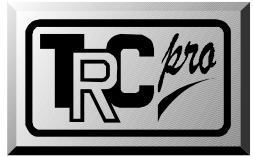
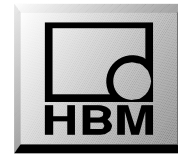
Zbog činjenice $\Delta R_i \ll R_i$ može se pisati sledeće:

$$\frac{V_0}{V_S} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

Korišćenjem $\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon$ sledi:

$$\frac{V_0}{V_S} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

Wheatston-ov most



Izlazni signal sa mosta V_o je funkcija:

- Napona napajanja mosta V_S

- k -faktora merne trake

- Deformacija ili promena napona u granama mosta $\varepsilon_1 \dots \varepsilon_2$

$$\frac{V_o}{V_S} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

Ako su deformacije u susednim granama istoga znaka, one se oduzimaju.

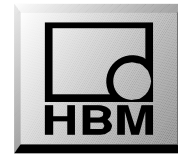
One se sabiraju, ako su suprotnog znaka.

Zahvaljujući tome, postavljanjem mernih traka u odgovarajuće grane mosta vrši se eliminacija raznih uticaja.

Da bi se od mernih traka napravio Wheatston-ov most koriste se:

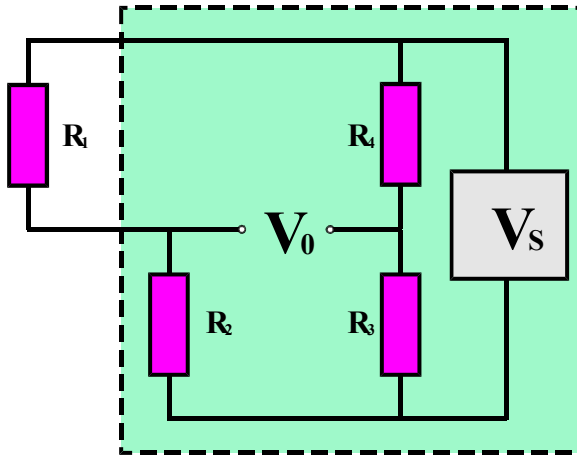
- Aktivne merne trake aplicirane na objekat ispitivanja ili merni pretvarač
- Kompenzacione merne trake (pasivni elementi koji služe za kompenzacionu uticaja temperature ili drugih efekata)
- Metalni (folijski) otpornici velike tačnosti i stabilnosti.

Wheatston-ov most

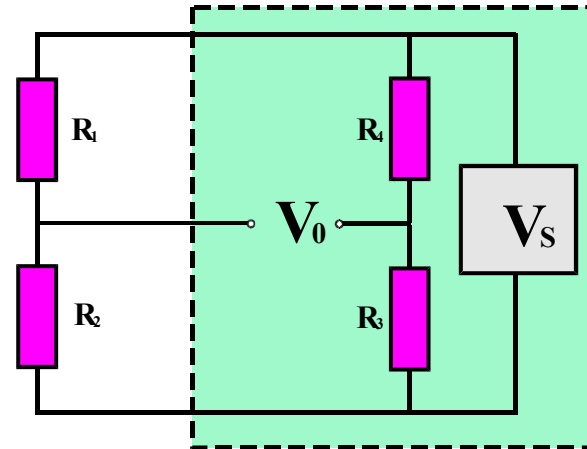


U primeni Wheatston-ovog mosta za eksperimentalnu analizu naponskog stanja, samo pojedine grane mosta sadrže aktivne trake, dok ostale trake služe samo za kompletiranje mosta:

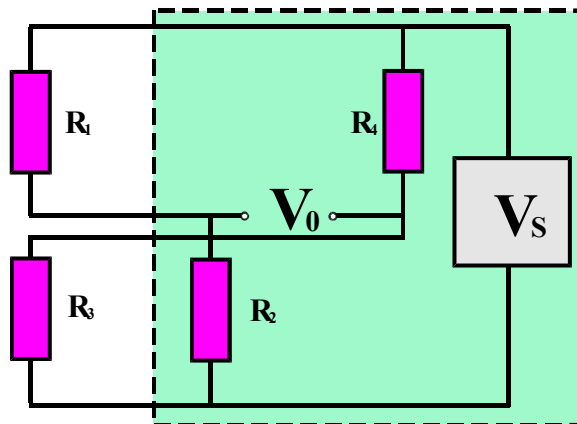
1/4



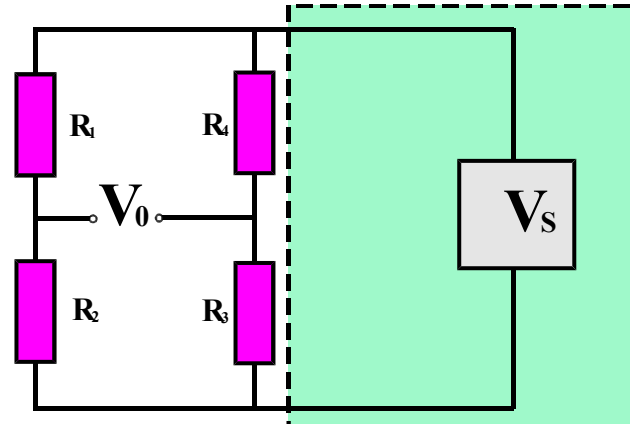
1/2

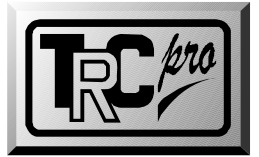
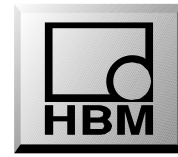


2/4



1/1

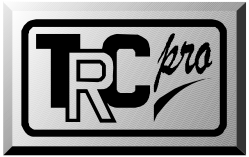
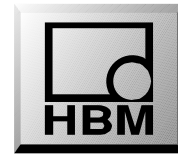




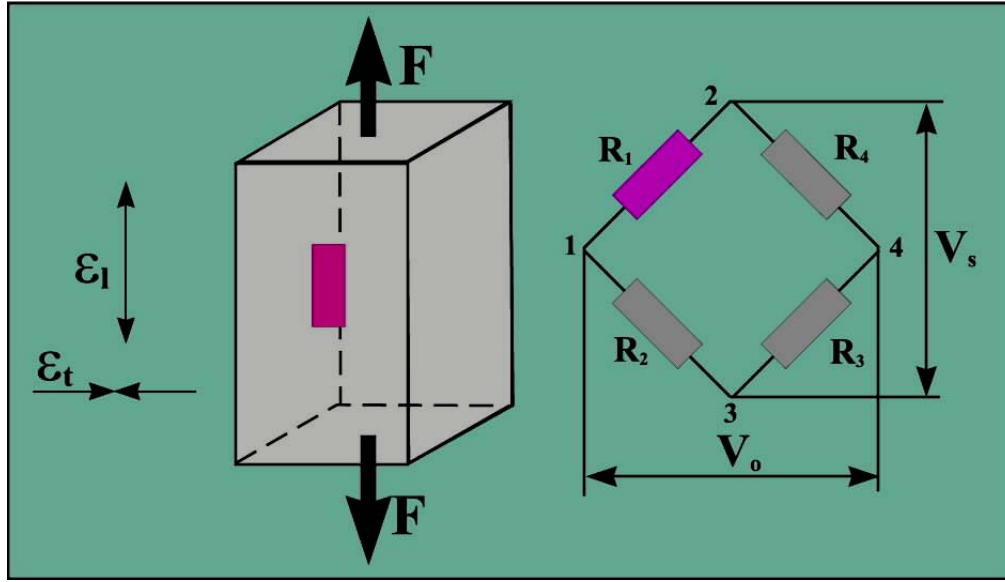
ELEMENTARNI SLUČAJEVI – OPTEREĆENJA i – PRIMENA MERNIH TRAKA

Elementarni slučajevi opterećenja

Aksijalno opterećenje



Veza u 1/4 most



Uzdužna deformacija:

$$\varepsilon_l = \frac{F}{A \cdot E}$$

Poprečna deformacija:

$$\varepsilon_t = -\mu \cdot \varepsilon_l = -\mu \cdot \frac{F}{A \cdot E}$$

Izlazni napon sa mosta:

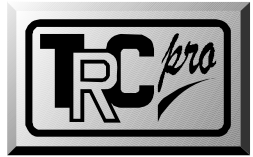
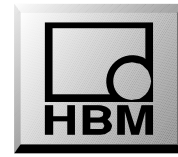
$$V_0 = \frac{k}{4} \cdot \varepsilon_l \cdot V_s = \frac{k}{4} \cdot \frac{F}{A \cdot E} \cdot V_s$$

Karakteristike 1/4 mosta:

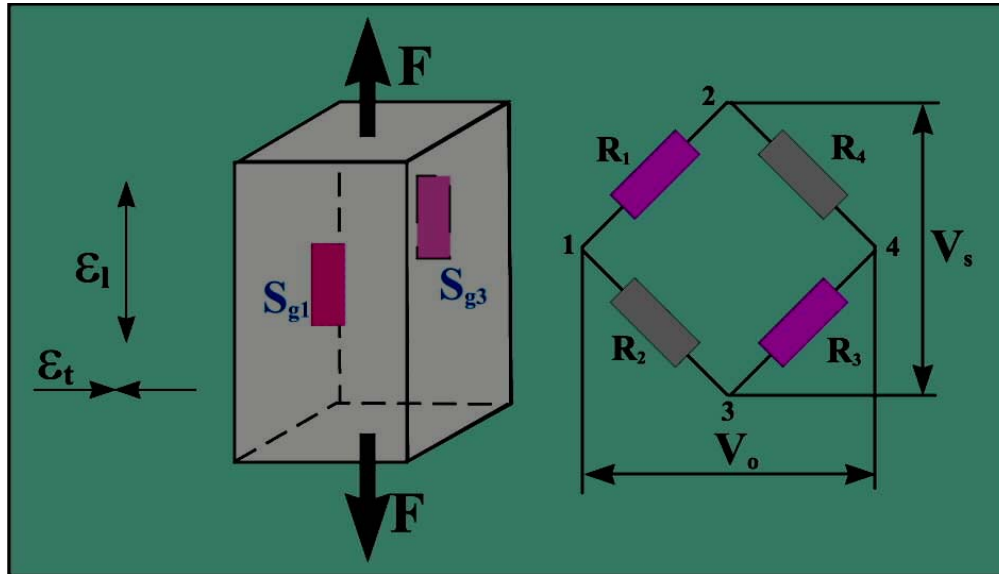
- Merni signal V_0 je proporcionalan deformaciji ε_l
- Ne postoji mogućnost kompenzacije termičkog širenja objekta ispitivanja (potrebno koristiti temperaturno kompenzujuće merne trake)
- Ako se javi i opterećenje na savijanje, ono će biti sadržano u mernom signalu (greška)

Elementarni slučajevi opterećenja

Aksijalno opterećenje



Veza u 2/4 most



*R₁ - merna traka 1,
R₃ - merna traka 2,
R₂, R₄ - otpornici*

Izlazni napon V₀:

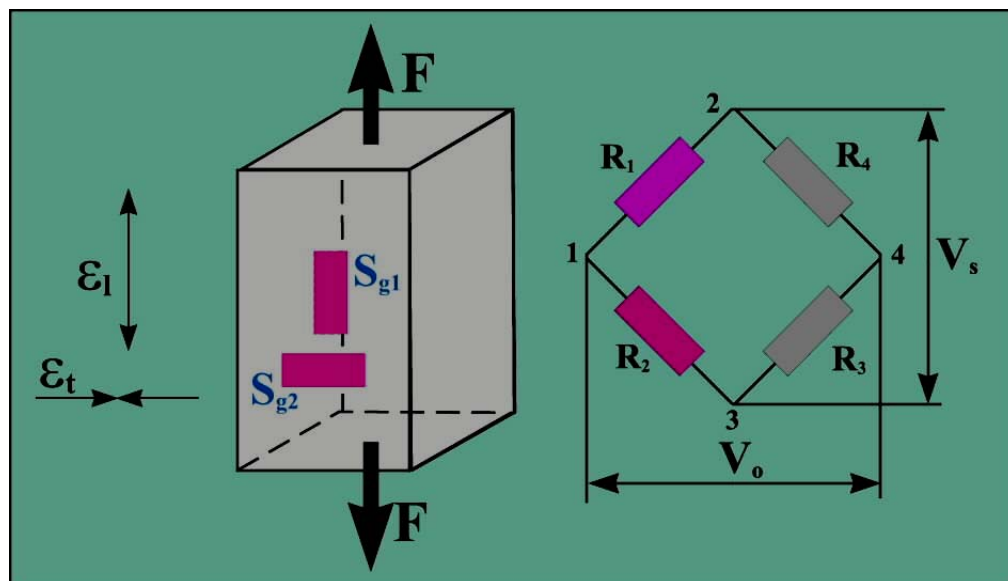
$$V_0 = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_l + \varepsilon_t) \cdot V_s = \frac{k}{2} \cdot \varepsilon_l \cdot V_s$$

$$V_0 = \frac{k}{2} \cdot \frac{F}{E \cdot A} \cdot V_s$$

Karakteristike 2/4 mosta:

- **Merni signal V_0 je uvećan za faktor 2 (u odnosu na 1/4 most)**
- **Ne postoji mogućnost kompenzacije termičkog širenja objekta ispitivanja (potrebno je koristiti temperaturno kompenzujuće merne trake)**
- **Ako se javi i opterećenje na savijanje, ono će biti kompenzovano i na taj način ne učestvuje u mernom signalu.**

Veza u 1/2 most



R₁- merna traka 1,

R₂- merna traka 2,

R₃, R₄ - otpornici

Izlazni napon V₀:

$$V_0 = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_l - \varepsilon_t) \cdot V_s = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_l + \mu \cdot \varepsilon_l) \cdot V_s$$

$$V_0 = \frac{1.3 \cdot k}{4} \cdot \varepsilon_l \cdot V_s = \frac{1.3 \cdot k}{4} \cdot \frac{F}{A \cdot E} \cdot V_s$$

Karakteristike 1/2 mosta:

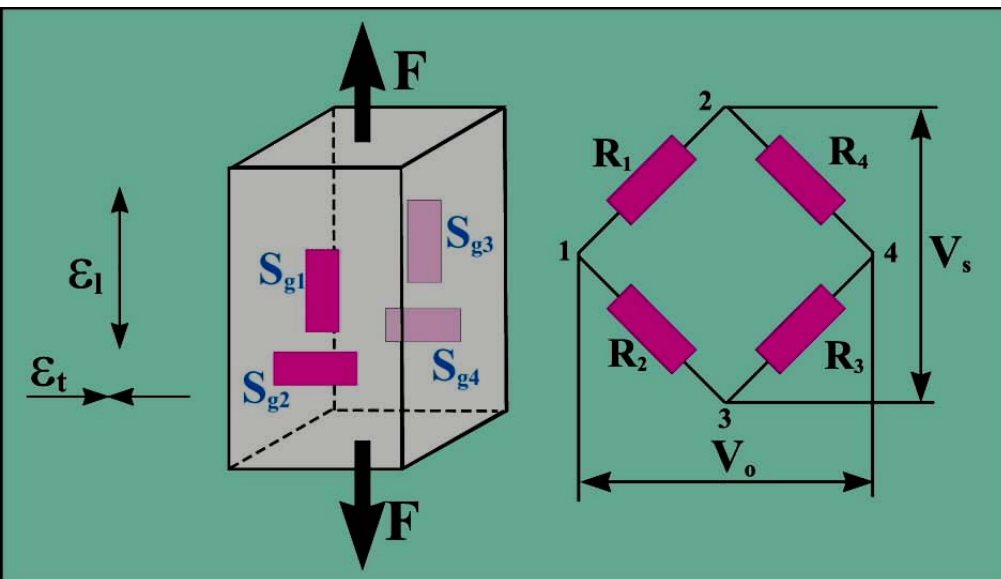
- **Merni signal V_0 je uvećan za 30% (u odnosu na 1/4 most)**
- **Postoji mogućnost kompenzacije termičkog širenja objekta ispitivanja**
- **Ako se javi i opterećenje na savijanje, ono će biti sadržano u mernom signalu**

Elementarni slučajevi opterećenja

Aksijalno opterećenje



Veza u pun most



R_1, R_2, R_3, R_4 - merne trake

Izlazni napon V_0 :

$$V_0 = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_l - \varepsilon_t + \varepsilon_l - \varepsilon_t) \cdot V_s$$

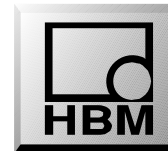
$$= \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_l + \mu \cdot \varepsilon_t + \varepsilon_l + \mu \cdot \varepsilon_t) \cdot V_s$$

$$V_0 = \frac{2.6 \cdot k}{4} \cdot \varepsilon_l \cdot V_s = \frac{2.6 \cdot k}{4} \cdot \frac{F}{A \cdot E} \cdot V_s$$

Karakteristike punog mosta:

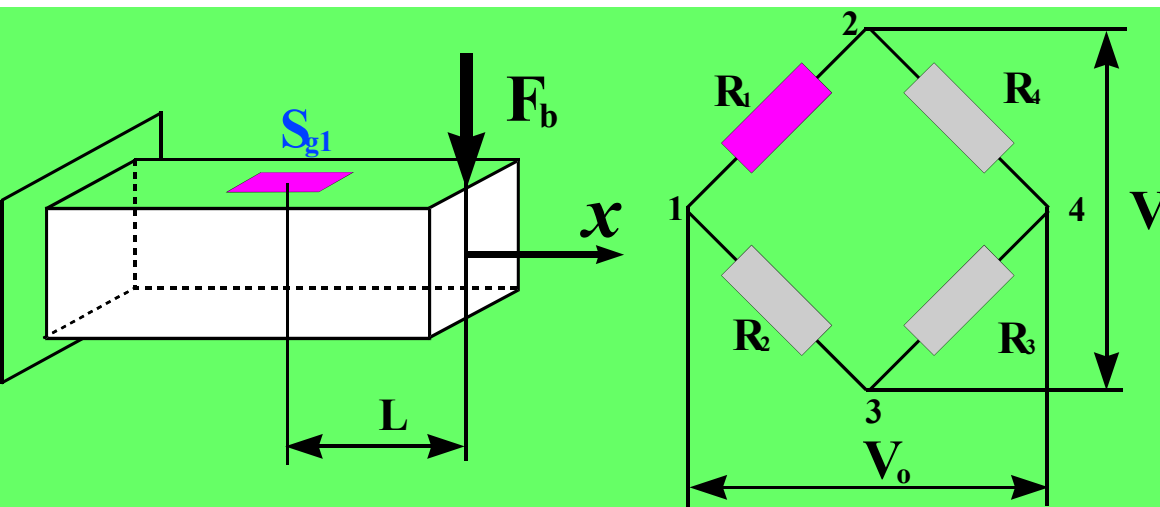
- Merni signal V_0 je uvećan za faktor 2.6 (u odnosu na 1/4 most)
- Postoji mogućnost kompenzacije termičkog širenja objekta ispitivanja
- Uticaj savijanja se kompenzuje
- Greške nastale usled raznih nesimetričnosti su iskompenzovane.

Elementarni slučajevi opterećenja



Savijanje

Veza u 1/4 most



R_1 - merna traka 1,

R_2, R_3, R_4 - otpornici

Uzdužna def. merne trake:

$$\varepsilon_{xl} = \frac{\sigma_x}{E} = \frac{M_b}{W_b \cdot E} = \frac{F \cdot L}{W_b \cdot E}$$

Poprečna def. merne trake:

$$\varepsilon_{xq} = -\mu \cdot \varepsilon_{xl}$$

Izlazni napon V_0 :

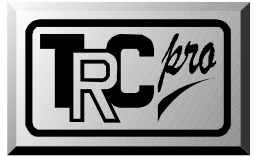
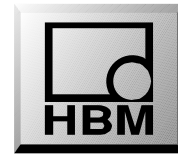
$$V_0 = \frac{V_s}{4} \cdot k \cdot \varepsilon_{xl}$$
$$= M_b \cdot \frac{V_s \cdot k}{4 \cdot W_b \cdot E}$$

Osnovne karakteristike:

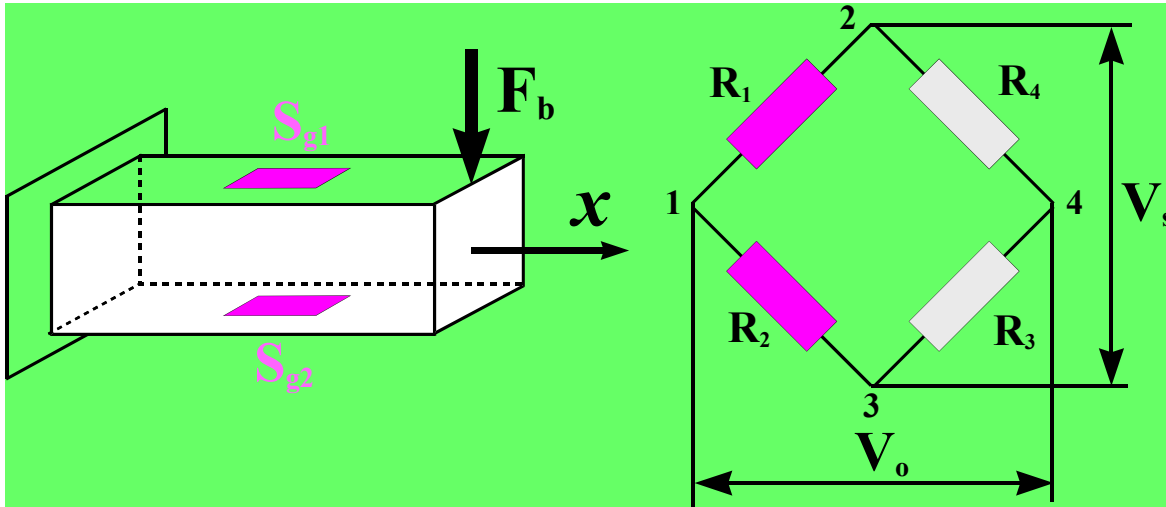
- Merni signal V_0 je proporcionalan momentu savijanja
- Nepostojanje temperaturne kompenzacije
- Ako se javi i aksijalno opterećenje, ono će biti sadržano u mernom signalu

Elementarni slučajevi opterećenja

Savijanje



Veza u 1/2 most



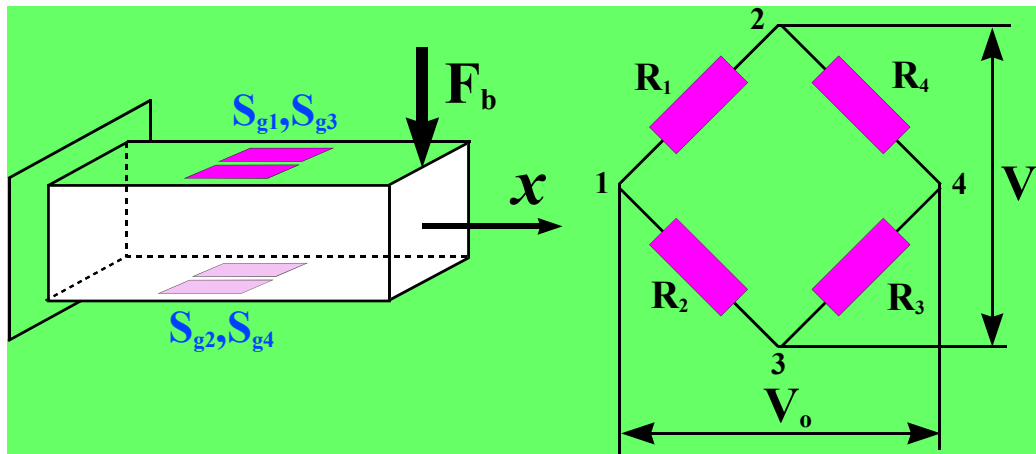
R_1 - merna traka 1,
 R_2 - merna traka 2,
 R_3, R_4 - otpornici
Izlazni napon V_0 :

$$V_0 = \frac{V_s}{4} \cdot k \cdot (\varepsilon_x + \varepsilon_x)$$
$$= M_b \cdot \frac{V_s \cdot k}{2 \cdot W_b \cdot E}$$

Osnovne karakteristike:

- Merni signal V_0 je dvostruko veći nego u slučaju 1/4 mosta
- Temperaturna kompenzacija
- Ako se javi i aksijalno opterećenje, ono će biti kompenzirano

Veza u pun most



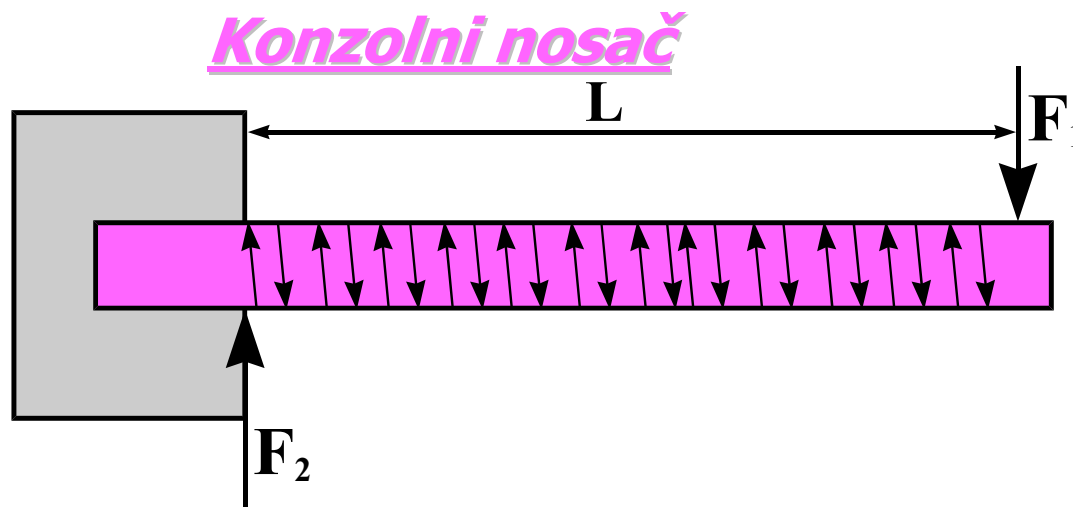
R_1, R_2, R_3, R_4 - merne trake

Izlazni napon V_o :

$$V_o = \frac{V_s}{4} \cdot k \cdot (\varepsilon_x + \varepsilon_x + \varepsilon_x + \varepsilon_x)$$
$$= M_b \frac{V_s \cdot k}{W_b \cdot E}$$

Osnovne karakteristike:

- Merni signal V_o je 4 puta veći nego u slučaju 1/4 mosta
- Postojanje temperaturne kompenzacije
- Mogućnost kompenzacije normalnog napona od aksijalnog opterećenja

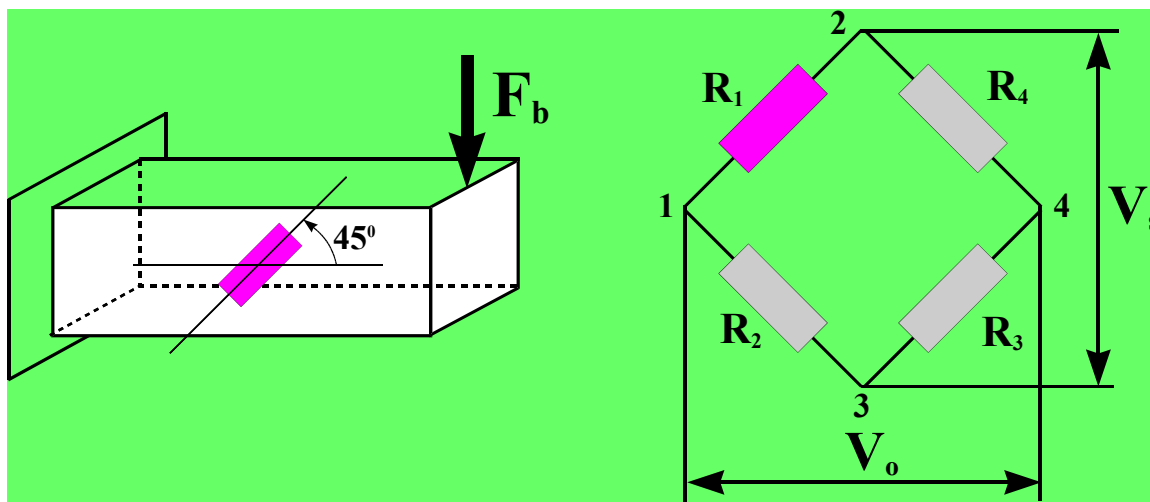


Tangencijalni napon τ i ugao klizanja γ (mera deformacije pri smicanju) se ne mogu direktno meriti pomoću mernih traka.

Normalni naponi na $\pm 45^\circ$ imaju svoje maksimalne vrednosti (glavni naponi).

$$\varepsilon_{45} = \frac{\tau}{2G} = \frac{1}{2} \cdot \gamma \quad \longrightarrow \quad \tau = \gamma \cdot G = 2 \cdot \varepsilon_{45} \cdot G$$

Veza u 1/4 most



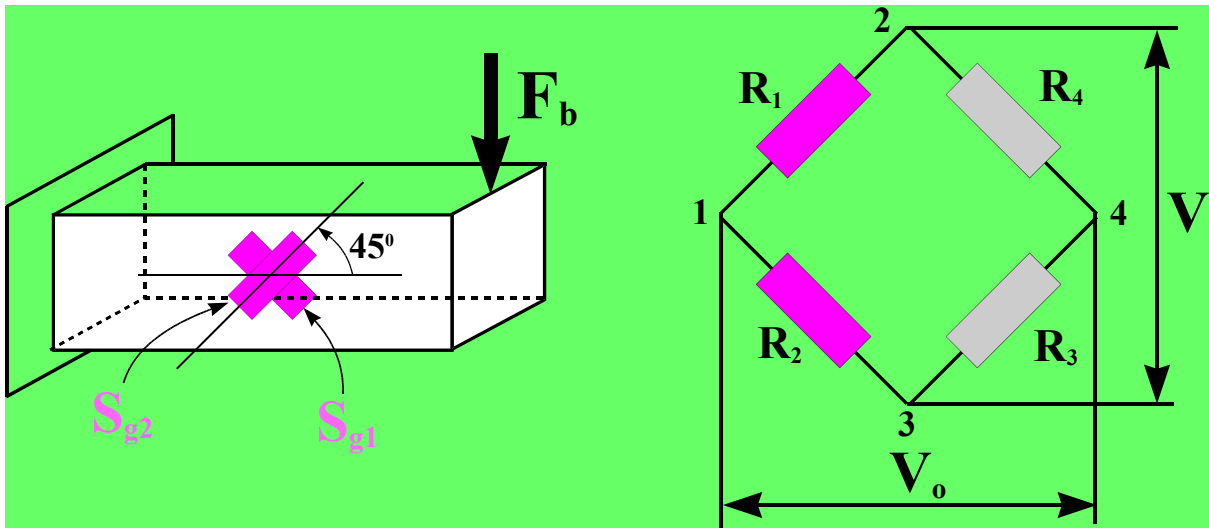
Izlazni napon V_0 :

$$V_0 = \frac{V_S}{4} \cdot k \cdot \varepsilon_{45}$$
$$= \frac{V_S}{4} \cdot k \cdot \frac{\tau}{2 \cdot G}$$

Osnovne karakteristike:

- **Merni signal V_0 je proporcionalan smicajnom naponu**
- **Nepostojanje temperaturne kompenzacije**
- **Nemogućnost kompenzovanja normalnog napona**

Veza u 1/2 most



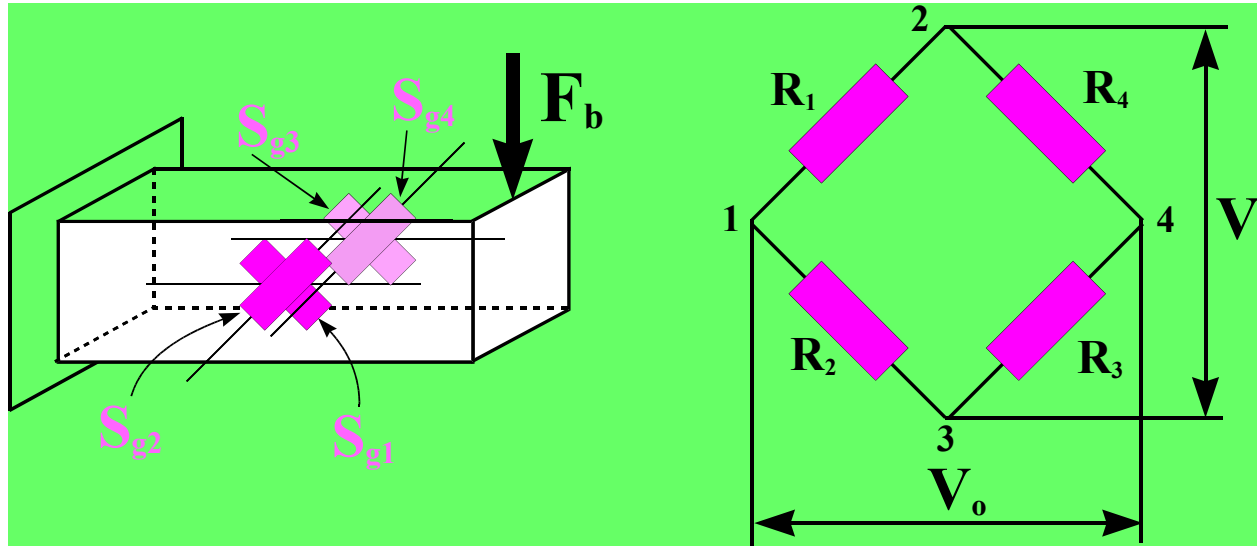
Izlazni napon V_0 :

$$V_0 = \frac{V_S}{4} \cdot k \cdot (\varepsilon_{45} + \varepsilon_{45})$$
$$= \frac{V_S}{2} \cdot k \cdot \frac{\tau}{2 \cdot G}$$

Osnovne karakteristike:

- **Merni signal V_0 je proporcionalan smicajnom naponu**
- **Postojanje temperaturne kompenzacije**
- **Kompenzacija normalnog napona**

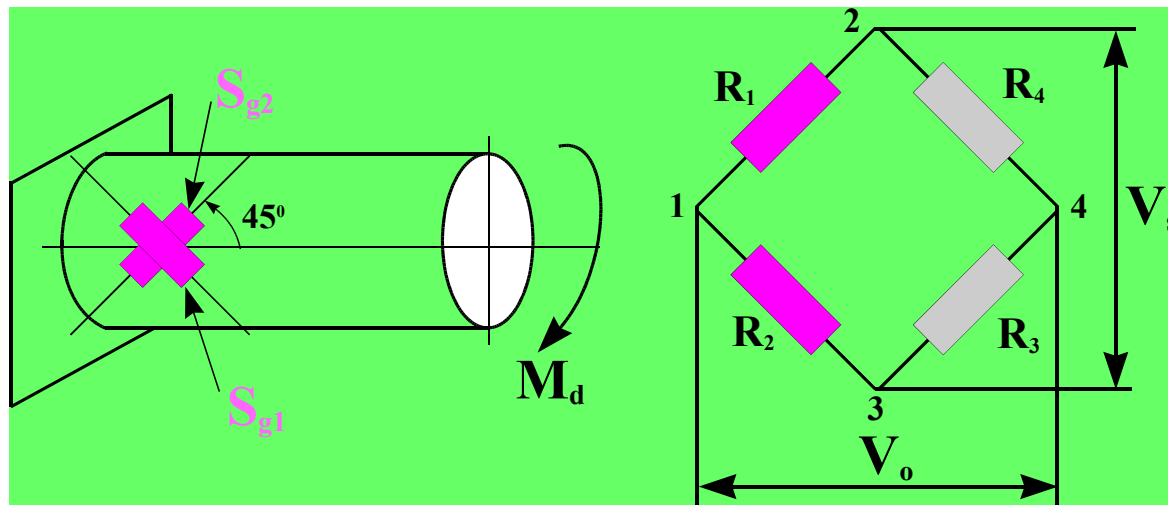
Veza u pun most



Izlazni napon V_o :

$$V_o = \frac{V_s}{4} \cdot k \cdot (\varepsilon_{45} + \varepsilon_{45} + \varepsilon_{45} + \varepsilon_{45}) = V_s \cdot k \cdot \frac{\tau}{2 \cdot G}$$

Veza u 1/2 most



Osnovne relacije:

$$\tau_{\max} = 2 \cdot \varepsilon_{45} \cdot G$$

$$M_d = \tau_{\max} \cdot S_p = 2 \varepsilon_{45} \cdot G \cdot S_p$$

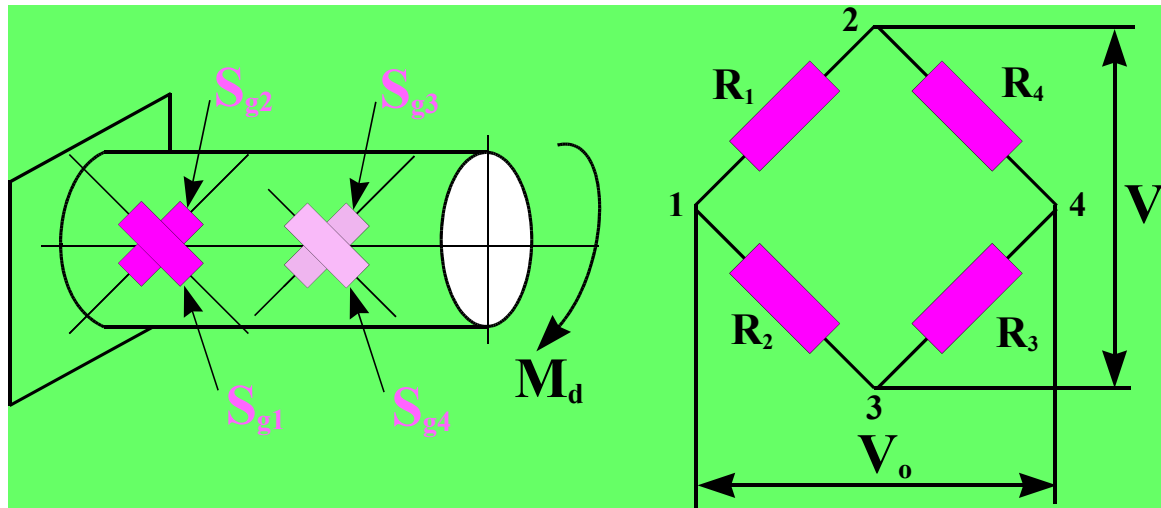
Izlazni napon V_0 :

$$V_0 = \frac{V_S}{4} \cdot k \cdot (\varepsilon_{45} + \varepsilon_{45})$$
$$= \frac{V_S}{2} \cdot k \cdot \frac{\tau_{\max}}{2 \cdot G}$$

Osnovne karakteristike:

- Merni signal V_0 je proporcionalan momentu torzije
- Postojanje temperaturne kompenzacije
- Smicajni naponi i normalni naponi od aksijalnog opterećenja su iskompenzovani
- Normalni napon od savijanja je takođe kompenzovan

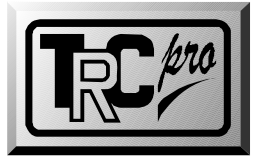
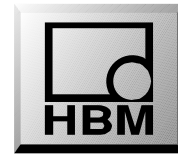
Veza u pun most



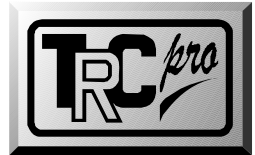
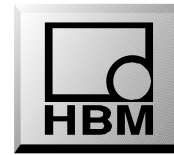
Izlazni napon V_0 :
$$V_0 = \frac{V_S}{4} \cdot k \cdot (\varepsilon_{45} + \varepsilon_{45} + \varepsilon_{45} + \varepsilon_{45}) = V_S \cdot k \cdot \frac{\tau_{\max}}{2 \cdot G}$$

Osnovne karakteristike:

- **Merni signal V_0 je proporcionalan momentu torzije**
- **Postojanje temperaturne kompenzacije**
- **Smicajni naponi i normalni naponi od aksijalnog opterećenja ili savijanja su iskompenzovani**



GREŠKE MERENJA I NJIHOVA REDUKCIJA



Montiranje: Izvori grešaka

- tip merne trake
- metoda vezivanja mernih traka
- zaštita, lemljenje, izolacija

Mehaničko opterećenje:

- udar
- zamor

Temperatura:

- nivo
- promena,
- gradijent

Efekti vezani za provodnike:

- el. otpor,
- kapacitet,
- simetrija

Hemijski efekti:

- vlažnost,
- uticaj raznih hemikalija,
- gasovi

Polja radijacije:

- neutron,
- gama zračenje
- el. i magnetna polja

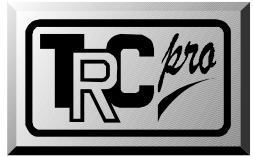
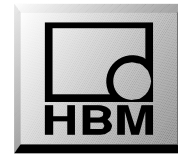
Pneumatika, hidraulika:

- pritisak
- vakum

Osobine obj. ispitivanja

- anizotropija
- nehomogenost

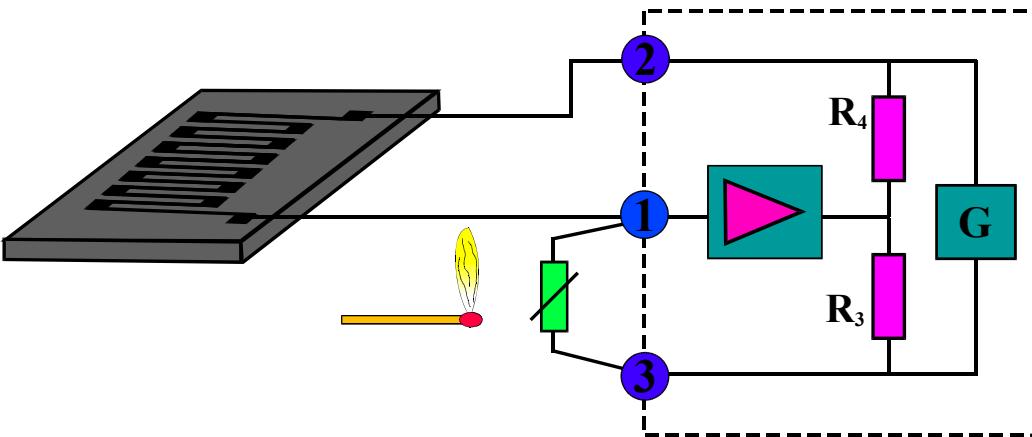
Temperaturna kompenzacija



Temperaturni odziv se javlja samo u slučaju da se temperatura objekta ispitivanja, provodnika ili merne opreme menja tokom merenja.

a) Uticaj temperature kod primene 1/4 mosta

- Primenjuje se u eksperimentalnoj analizi napona*
- Primena temperaturno kompenzirane merne trake*



Temp. odziv usled zagrev. provodnika

$$\varepsilon_{ia} = \frac{\rho \times l/A \times \alpha_{rl} \times \Delta\theta}{k \times (R_{sg} + \rho \times l/A)} \times 10^6 \quad (\mu\text{m/m})$$

l - Dužina provodnika

A - Površina popreč. preseka provodn.

R_{sg} - El. otpor merne trake

k - k faktor merne trake

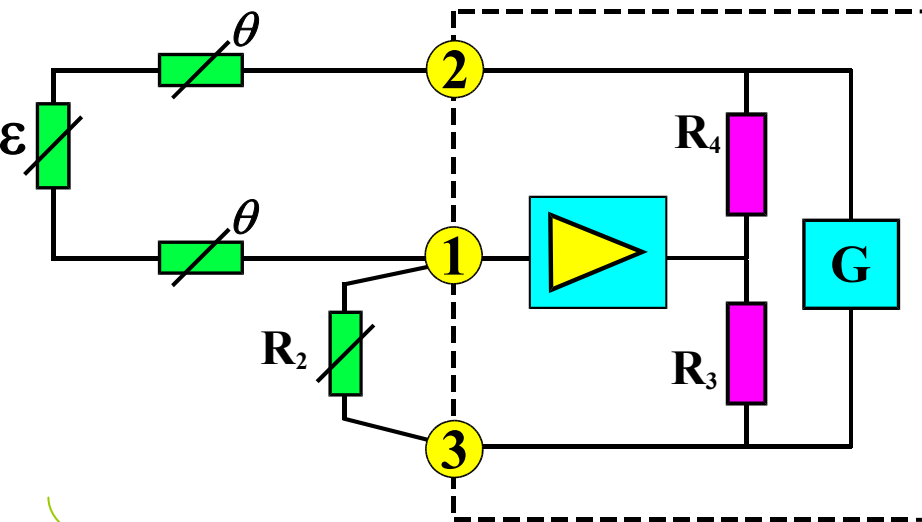
ρ - Spec. provodnost materijala provodn.

α_{rl} - Temperatura provodnika

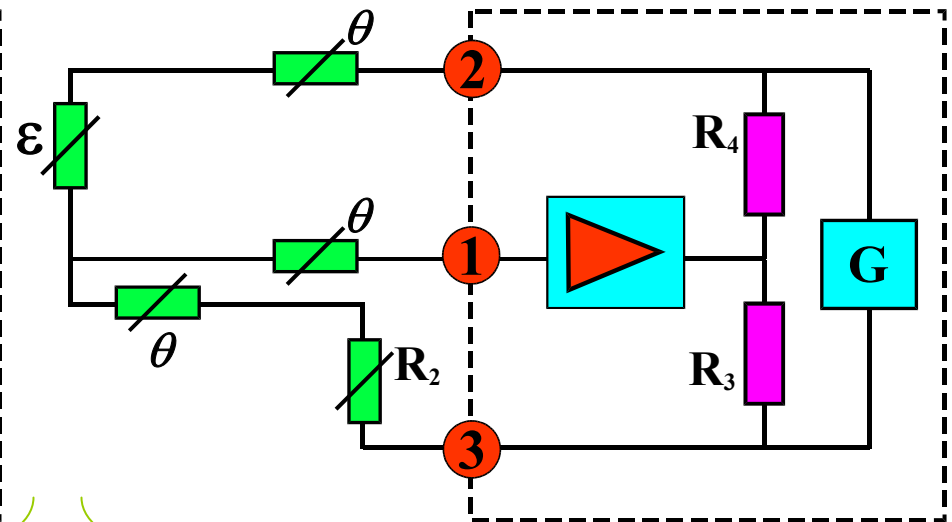
$\Delta\theta$ - Promena temperature

b) Temp. komp. primenom "trožilnog" 1/4 mosta

Kompenzacija temp. odziva provodnika povezivanjem susednih grana mosta.



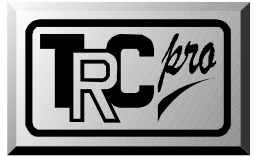
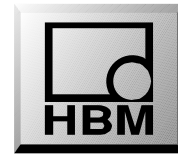
Dvožilna veza: spoljni i povratni provodnik su vezani sa mernom trakom.



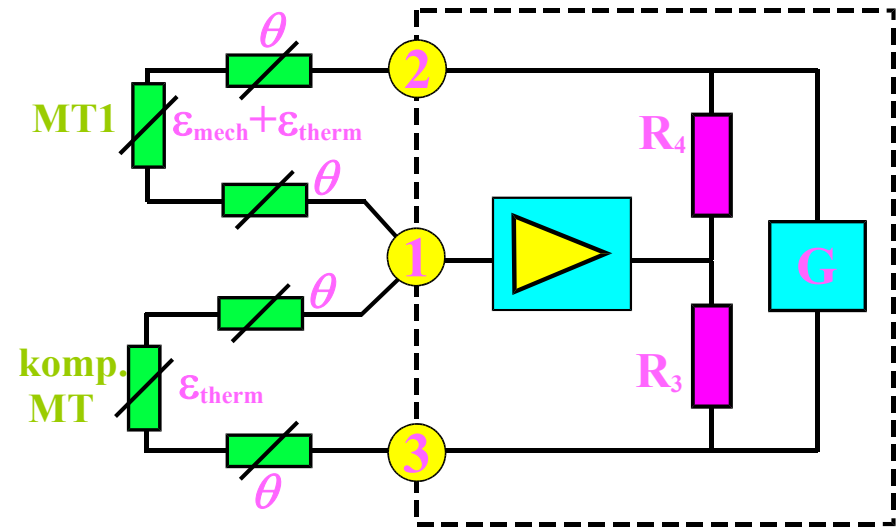
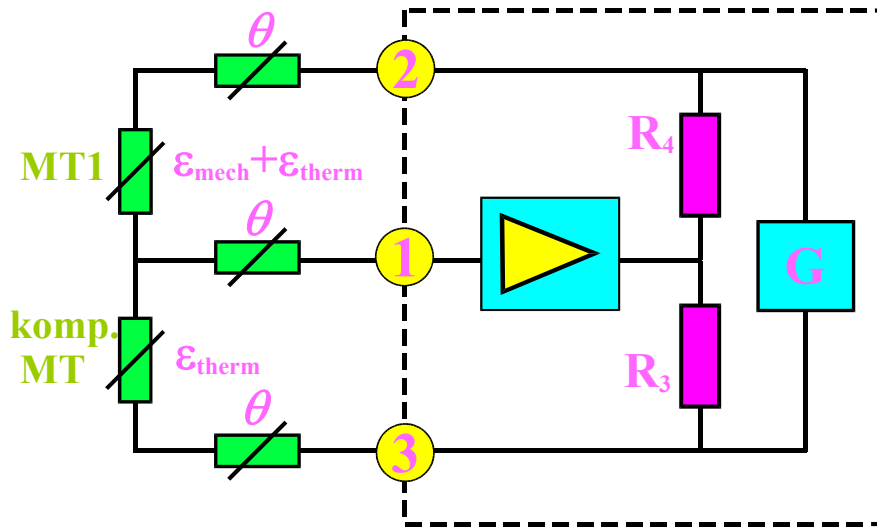
Trožilna veza: spoljni provodnik u vezi sa m.t, povratni provodnik u vezi sa kompenzatorskim otpornikom R_2 .

U cilju potpune kompenzacije, spoljni i povratni provodnici moraju imati identične fizičke karakteristike tj. dužinu, poprečni presek, temp. koeficijent i istu temperaturu.

Temperaturna kompenzacija



b) Temp. komp. primenom 1/4 mosta sa kompenzacionim mernim trakama



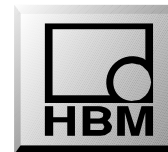
Kompenzacija se postiže korišćenjem kompenzacione merne trake sa istim karakteristikama kao i aktivna m.t. koja je postavljena u neopterećenu zonu strukture.

Deform. koju registruje MT1: $\epsilon_1 = \epsilon_{\text{mech}} + \epsilon_{\text{therm}}$

Deform. koju registruje komp. MT1: $\epsilon_2 = \epsilon_{\text{therm}}$

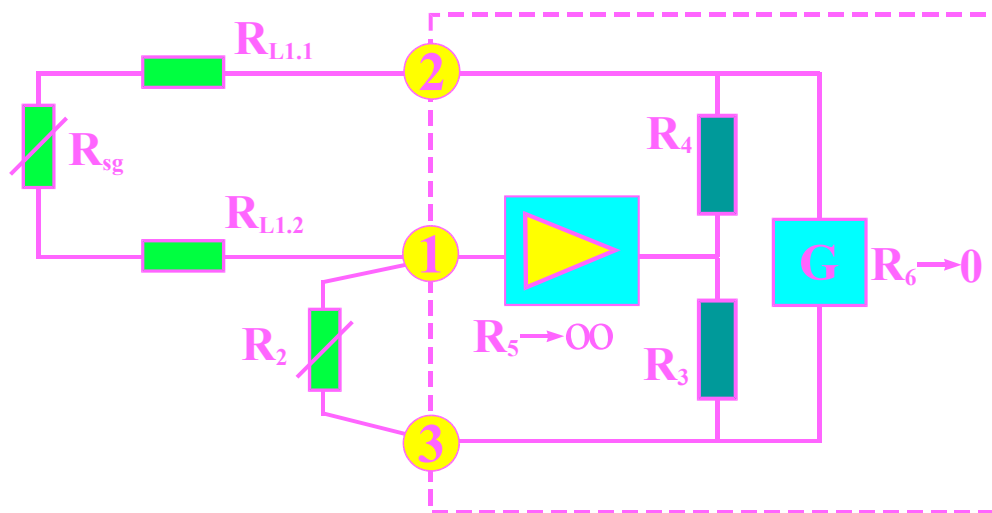
$$\epsilon_1 = (\epsilon_{\text{mech}} + \epsilon_{\text{therm}}) - (\epsilon_{\text{therm}})$$

Uticaj otpora vodova



- Otpor vodova može da dovede do debalansa mosta i čak da onemogući balansiranje mosta.
- Otpor vodova smanjuje el. signal proizveden od strane mernih traka (napajanje mosta) i pri tome predstavlja izrazit izvor grešaka merenja.

a) 1/4 most



Jednačina mosta daje:

$$\frac{V_0}{V_S} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_{sg}}{R_{sg}} \right)$$

$$\frac{\Delta R_{sg}}{R_{sg}} = \varepsilon \cdot k$$

U slučaju da postoji otpor vodova:

$$\frac{\Delta R_{sg}}{R_{L1,1} + R_{sg} + R_{L1,2}} < \varepsilon \cdot k$$



Izlazni signal sa mosta je isuviše mali !

PRIMER:

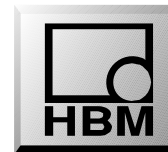
Provodnik dužine 100 m (2 bakarna jezgra, po 100 m svako) sa pop-rečnim presekom jezgra 0.5 mm^2 u četvrt mostu, tj. otpori provodnika su u serijskoj vezi sa otporima mernih traka, daje grešku od:

- *5.8% sa otporom merne trake od 120Ω ,*
- *1.8% sa otporom merne trake od 350Ω ,*
- *1.2% sa otporom merne trake od 600Ω .*

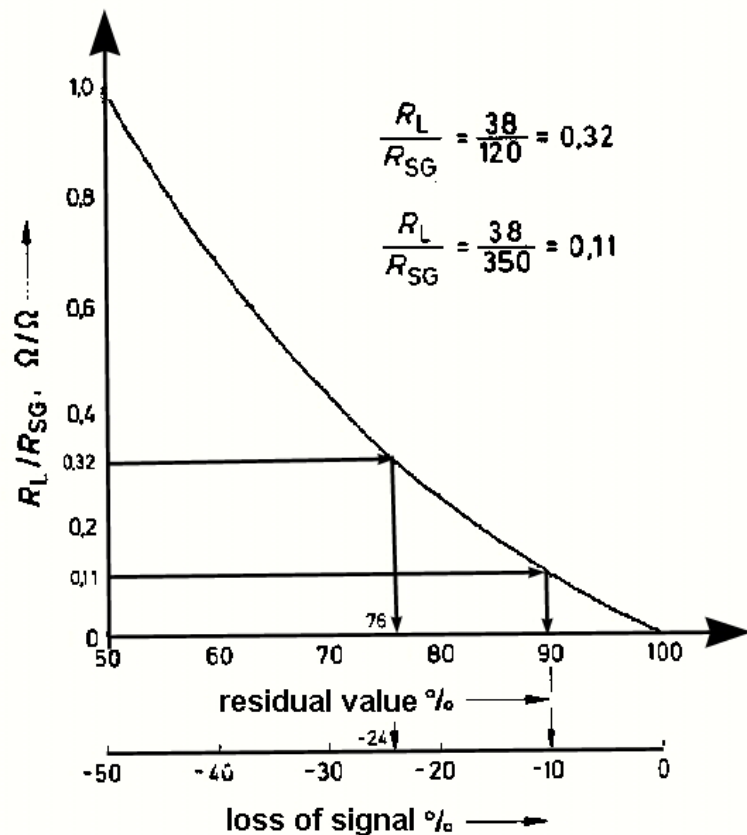
Sa poprečnim presekom jezgra od 0.14 mm^2 , greške merenja iznose:

- *17.5% sa otporom merne trake od 120Ω ,*
- *6.8% sa otporom merne trake od 350Ω ,*
- *3.7% sa otporom merne trake od 600Ω .*

Uticaj otpora vodova



Korekcija izmerene greške se izvodi uz odgovarajući dijagram, a korišćenjem sledeće formule:



$$\frac{R_L}{R_{SG}} = \frac{38}{120} = 0,32$$

$$\frac{R_L}{R_{SG}} = \frac{38}{350} = 0,11$$

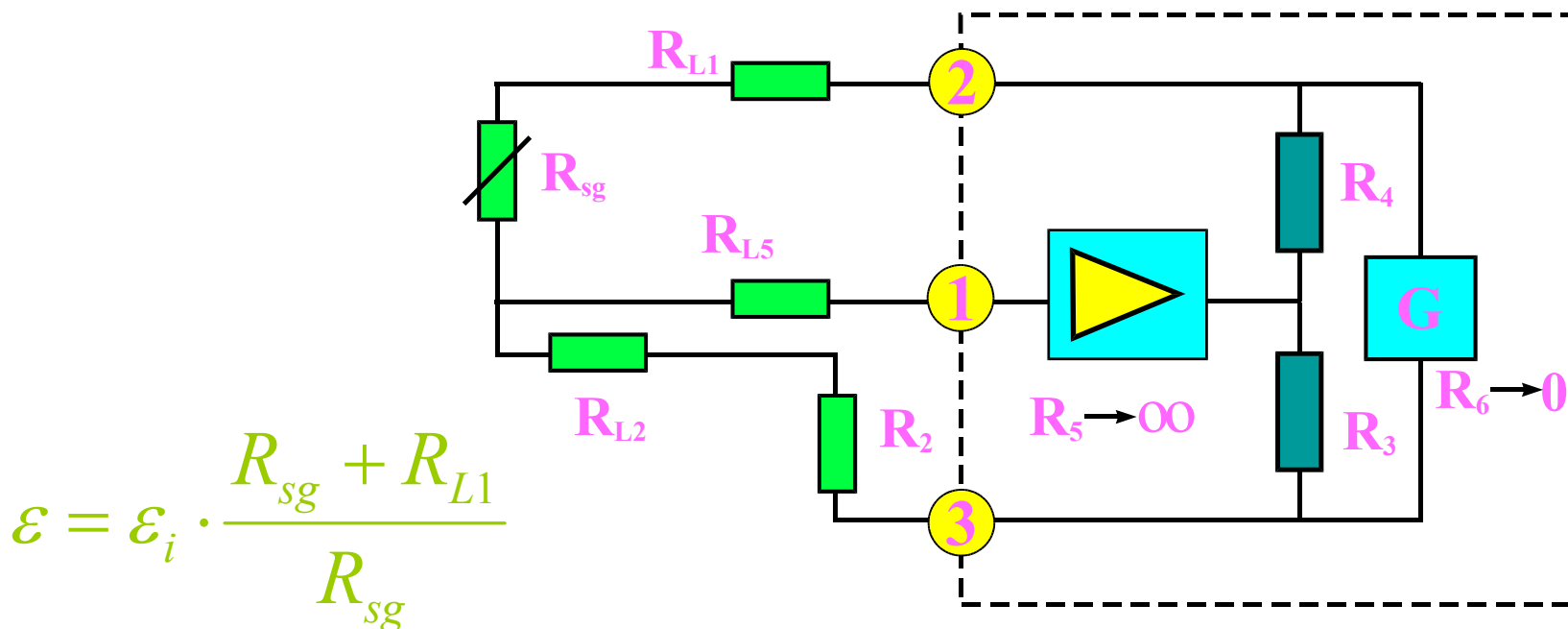
$$\varepsilon = \varepsilon_i \cdot \frac{100\%}{\text{pokaz.otp.\%}}$$

ε - tačna vrednost

ε_i - pokazana vrednost

b) 1/4 most u "trožilnoj" vezi

Sa 1/4 mostom u "trožilnoj" vezi, jedino je izlazni provodnik u rednoj vezi sa mernom trakom:



Povratni otpor R_{L2} je lociran u pasivnoj grani mosta, tako da nema uticaja na rezultate merenja.

Eliminacija efekata kablova primenom specijalnih kola

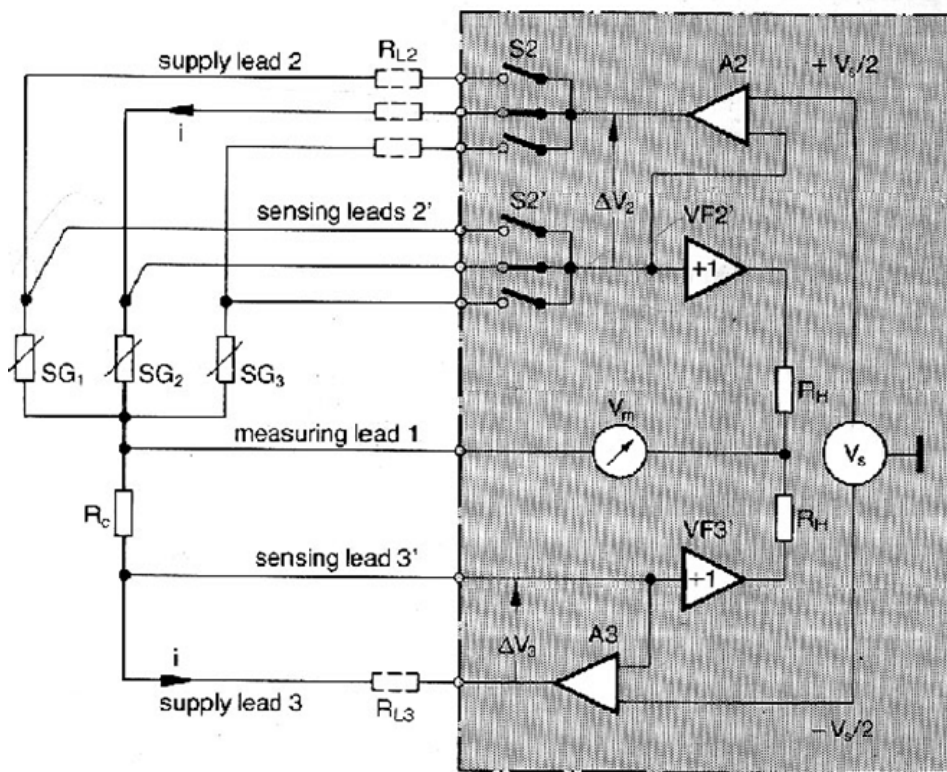


U cilju eliminacije efekata kablova, HBM je razvio tzv. “KREUZER-ovo KOLO” i “PROŠIRENO KREUZER-ovo KOLO”.

Napon napajanja mosta V_s predstavlja referentni napon za pojačala A_2 i A_3 koji koriguje njihov izlaz sve dok napon pada. Kompenzacija se vrši kroz kontrolne linije ΔV_2 i ΔV_3 . Na taj način, se most u svakom trenutku napaja tačnim naponom V_s .

Ovo se kolo može koristiti za:

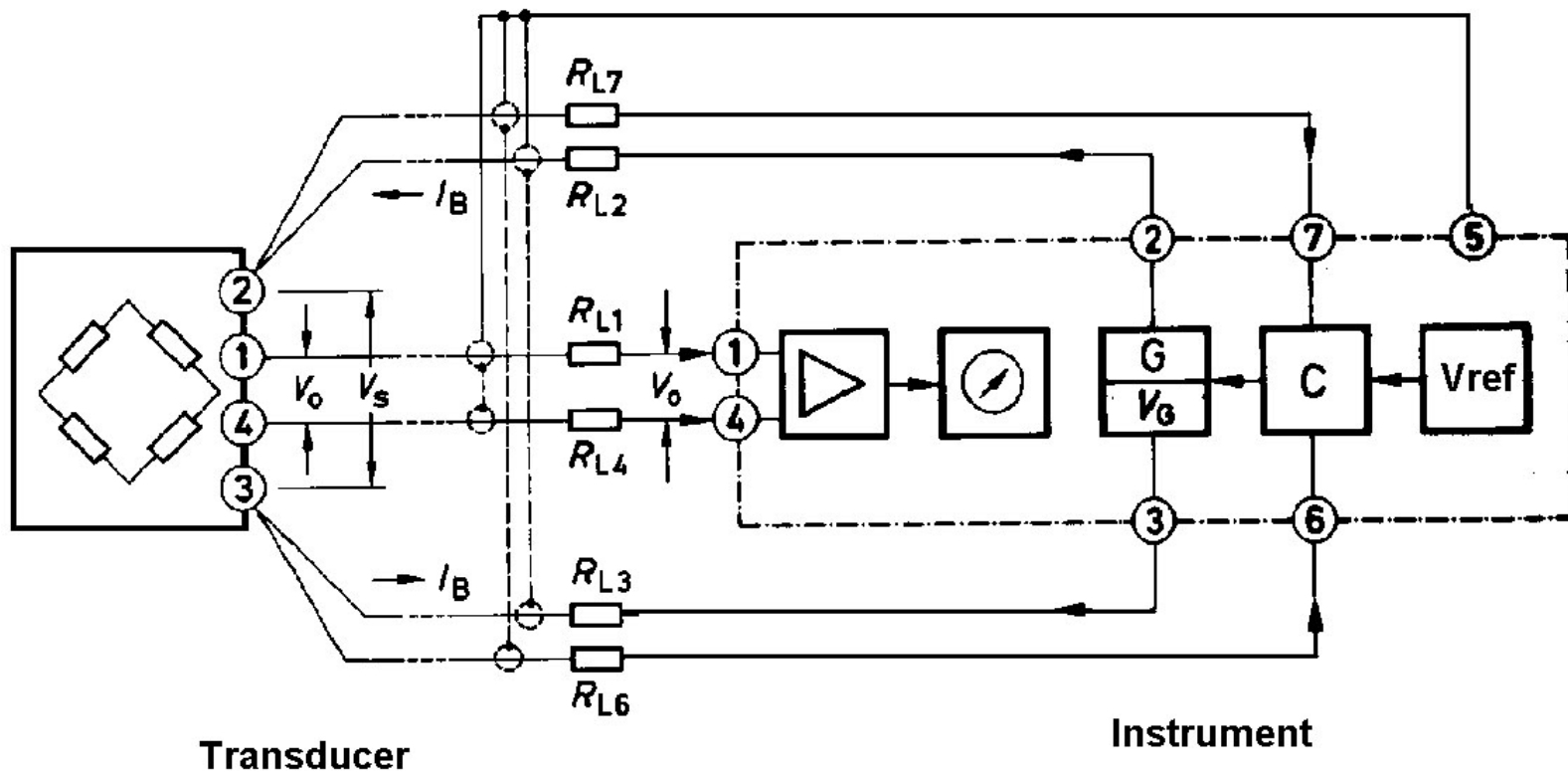
- četvrt-most
- polu-most
- pun most

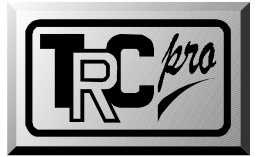
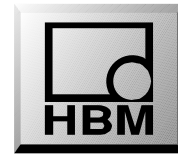


Eliminacija efekata kablova primenom specijalnih kola



Drugi vid eliminacije efekata kablova je korišćenje ŠESTOŽILNE VEZE kod primene punog mosta:

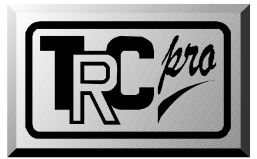
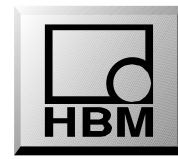




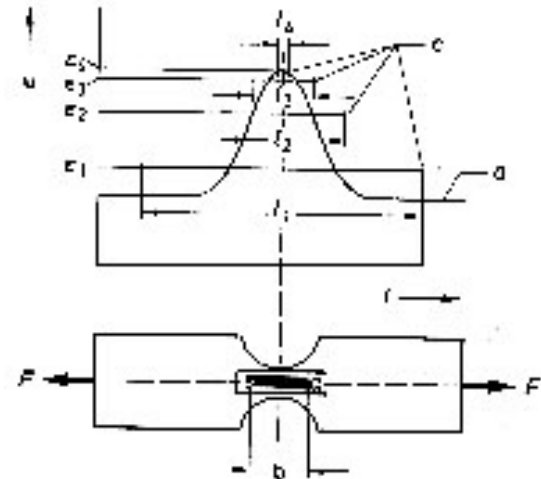
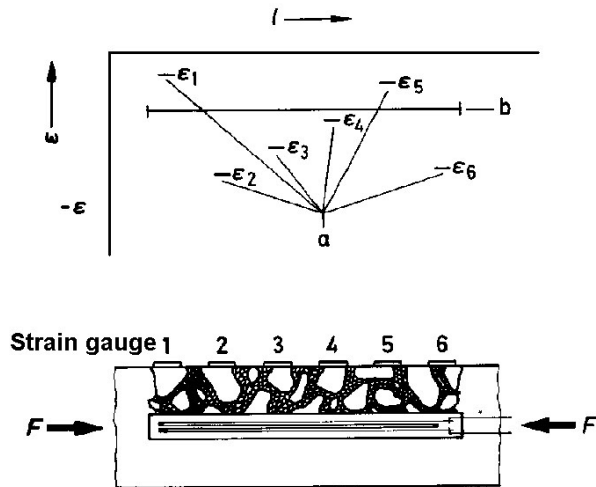
SPECIJALNI SLUČAJEVI – OPTEREĆENJA i – PRIMENA MERNIH TRAKA

Specijalni slučajevi opterećenja

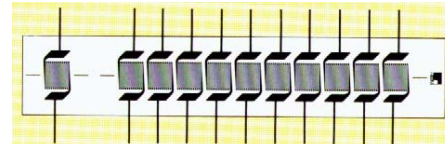
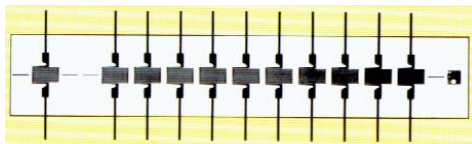
Nehomogeno polje napona



Nehomogeno polje napon/deformacija se javlja pri postojanju koncentracija napona, merenja na drvetu, betonu, kompozitnim materijalima itd.

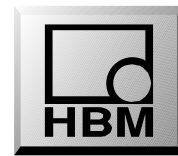


- *M.t. pokazuje osrednjenu vrednost zavisno od dužine vlakna*
- *Vršne vrednosti se dobijaju korišćenjem ekstremno kratkih m.t.*
- *Za određivanje gradijenata napona koriste se lanci mernih traka*



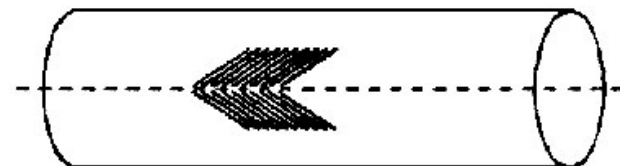
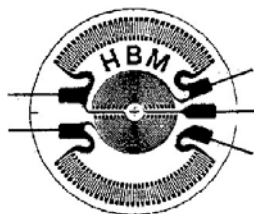
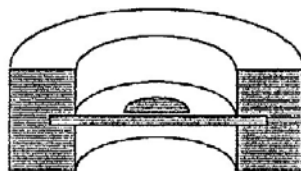
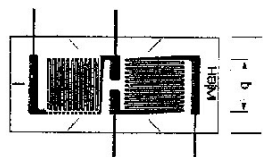
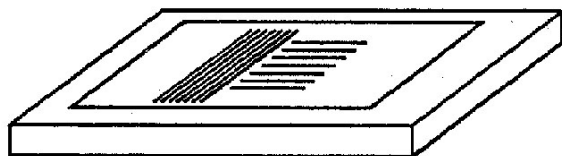
Specijalni slučajevi opterećenja

Ravansko stanje napona



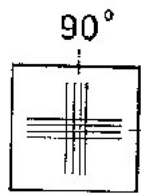
Slučaj a: glavni pravci su poznati:

➤ Koriste se $0^\circ/90^\circ$ rožete

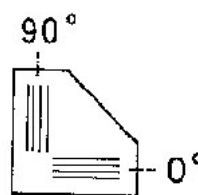


Slučaj b: glavni pravci su nepoznati:

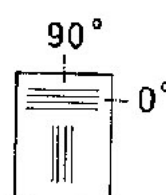
➤ Koriste se $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ ili rožete $0^\circ/60^\circ/120^\circ$



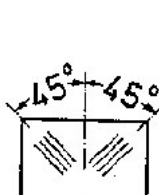
20.03.2007



L

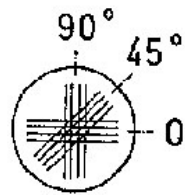


T

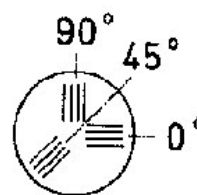


V

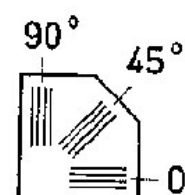
Flouinger Baldwin Messtechnik
TRCpro Petrovaradin



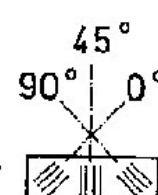
star



Y-45°



fan

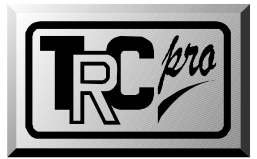
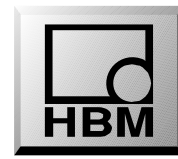


row

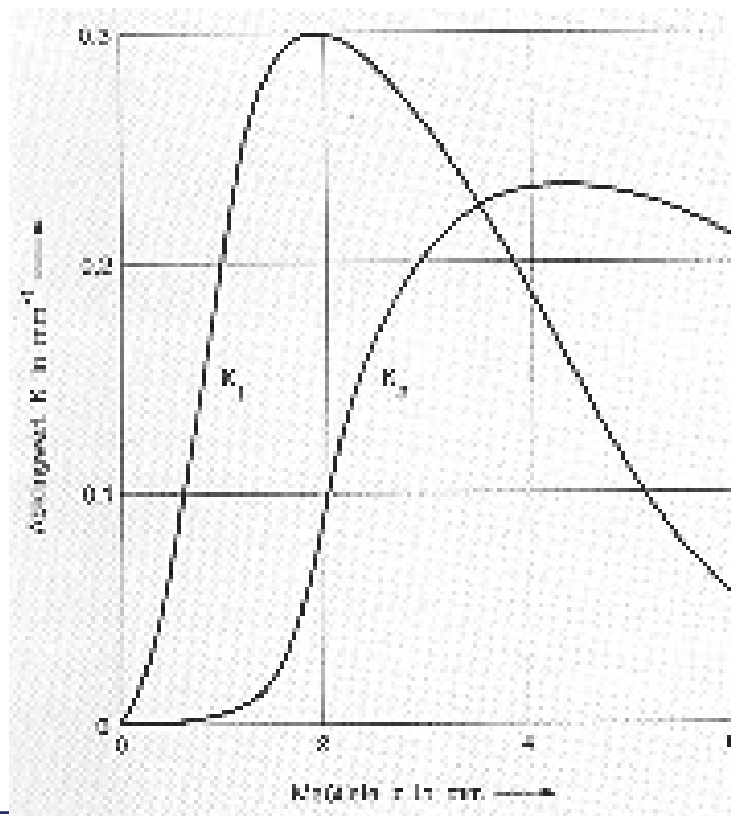
Dr. Florian Licher

Specijalni slučajevi opterećenja

Određivanje zaostalih napona

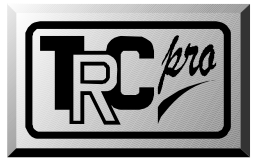
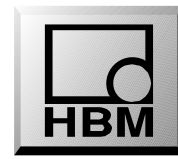


Ova metoda daje informaciju o iznosu zaostalih napona ispod površine objekta ispitivanja. Da bi se oni i odredili, potrebno je poznavati relaksacione funkcije k_1 i k_2 koje su funkcije od dubine izbušenog prstena.

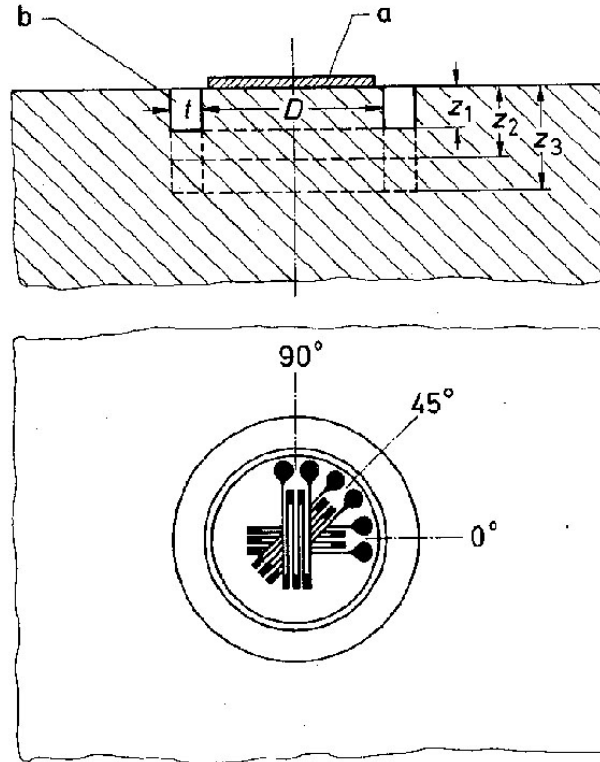


Specijalni slučajevi opterećenja

Određivanje zaostalih napona



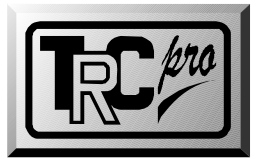
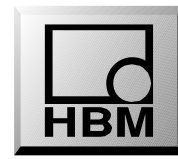
b: Metod prsten-jezgro



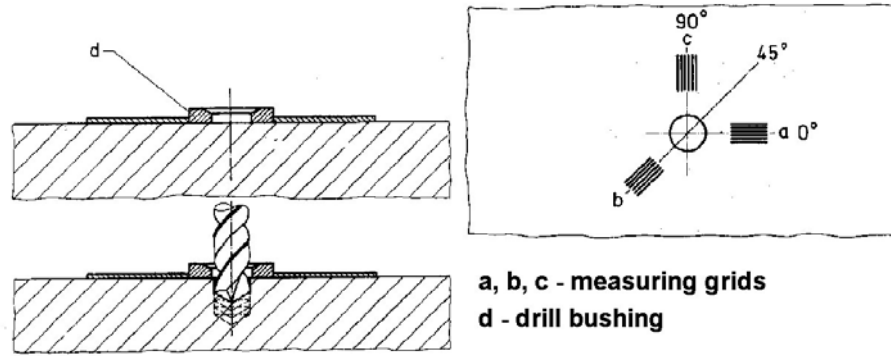
Pri ovoj metodi se na površini objekta, gde određuju zaostali naponi, urezuje žljeba određene dubine (z). Na taj se način izaziva relaksacija zaostalih napona.

Specijalni slučajevi opterećenja

Određivanje zaostalih napona



a: Metod bušenja otvora



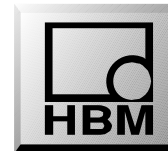
- *Izbušeni otvor prekida tok sila na površini, i tako dovodi do relaksacije materijala oko otvora.*
- *Odgovarajuća rozeta 0°/45°/90° je pozicionirana na mernoj tački i registruje referentne vrednosti ε_r (ε_a ε_b ε_c)*

Nakon što se otvor izbuši, mere odgovarajuće vrednost deformacija, u oznaci ε_d . Razlika deformacija pre i posle bušenja otvora predstavlja deformaciju relaksacije:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_d - \varepsilon_r$$

Specijalni slučajevi opterećenja

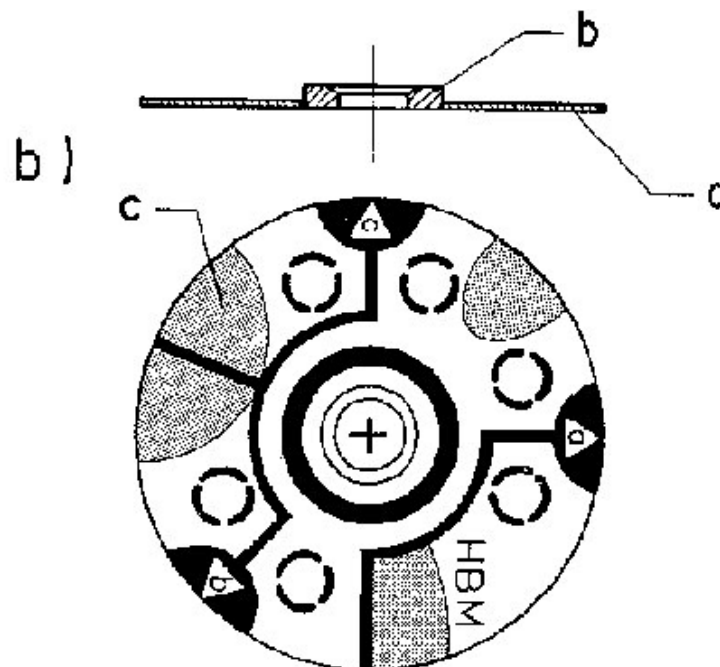
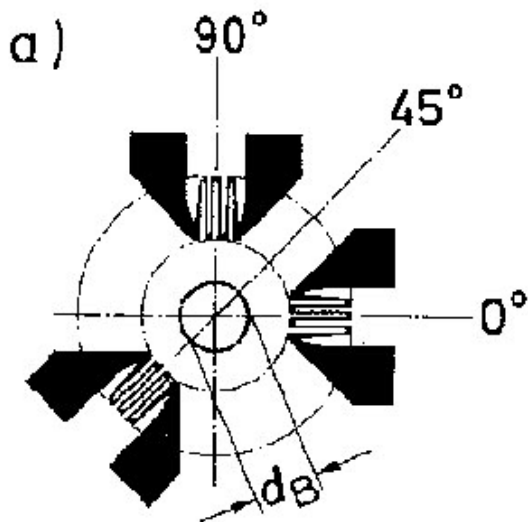
Određivanje zaostalih napona



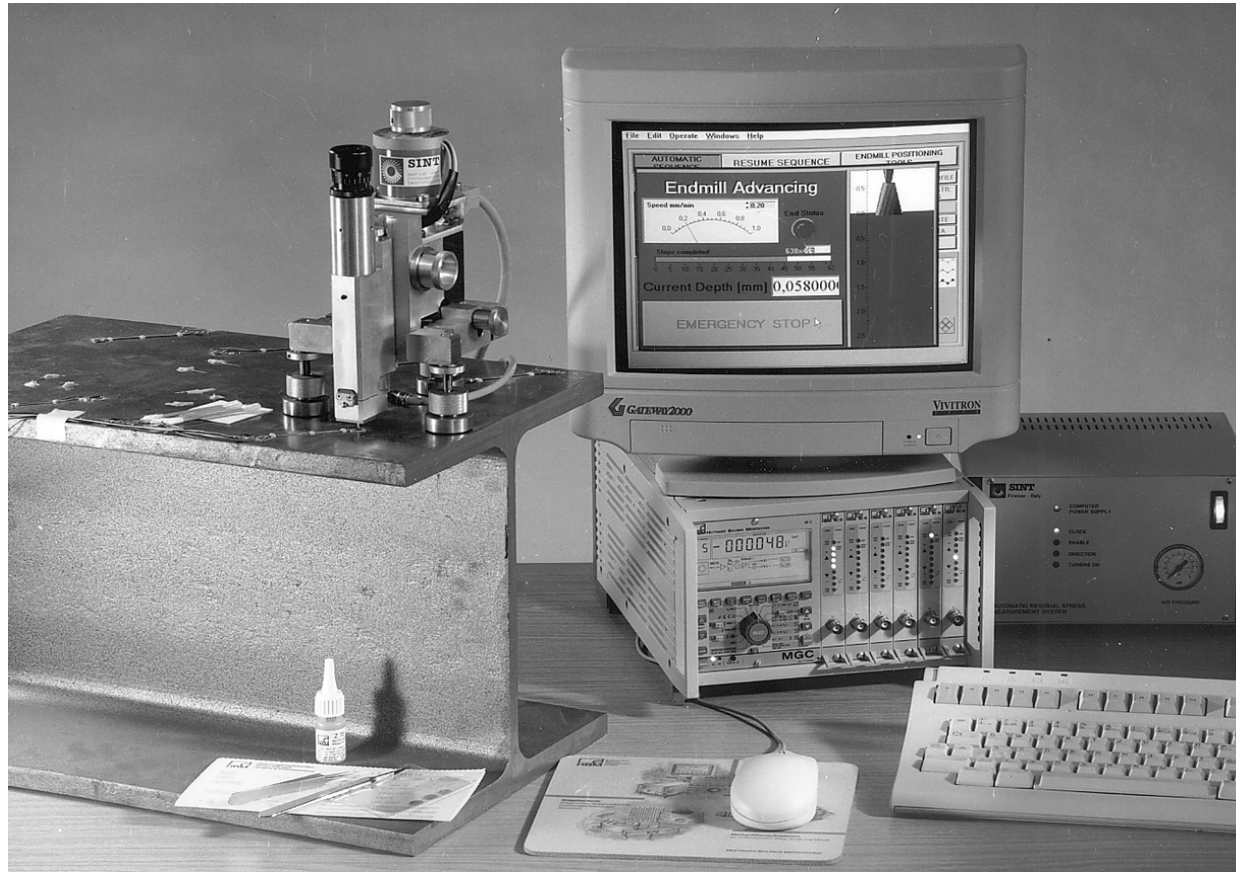
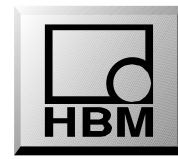
Glavni normalni naponi se tada određuju kao:

$$\sigma_{1,2} = -\frac{E}{4 \cdot A} \cdot (\Delta\varepsilon_a + \Delta\varepsilon_c) \pm \frac{E}{4 \cdot B} \cdot \sqrt{(\Delta\varepsilon_a - \Delta\varepsilon_c)^2 + (\Delta\varepsilon_a + \Delta\varepsilon_c - \Delta\varepsilon_b)^2}$$

A i B su konstante koje zavise od veličine primenjene rozete.

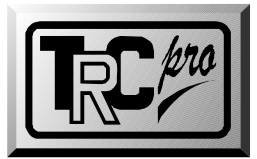
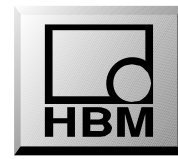


Specijalni slučajevi opterećenja ***Određivanje zaostalih napona***

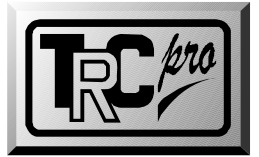
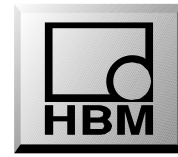


Aparatura za određivanje zaostalih napona MTS3000

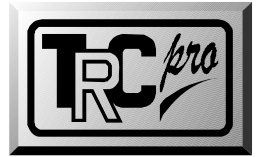
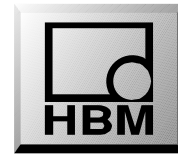
Specijalni slučajevi opterećenja ***Određivanje zaostalih napona***



Određivanje zaostalih napona na sudu pod pritiskom



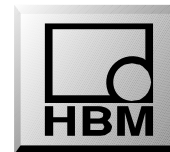
IZRADA PRETVARAČA ZA MERENJE MEHANIČKIH VELIČINA



Fizikalna veličina (masa, sila, pritisak...) koja se meri deluje na element. Merna traka koja je primenjena na površinu elementa i vezana u Wheatston-ov most transformiše deformaciju elementa u električni signal.

Prednosti

- Odlična linearnost, histereza i mogućnost kompenzacije merne trake u okviru Wheatston-ovog mosta.*
- Zanemarljiva masa i veličina merne trake dozvoljava praćenje procesa koji se odigravaju sa visokim frekvencijama*
- Mogućnosti merenja kako statičkih, tako i dinamičkih veličina,*
- Odlični preduslovi za kompenzaciju temperaturnih efekata,*
- Jednostavna konstrukcija,*
- Dugotrajnost davača, odlične karakteristike pri ispitivanju na zamor.*

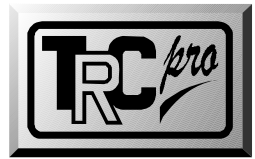
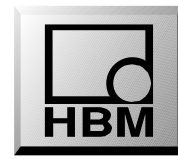


Mane

- *Oblast primene: obično do 200°C (merni pretvarači za specijalne namene idu do 350°C)*
- *Relativno slab izlazni signal ($k=2$). Primena samo u stabilnim uslovima,*
- *Osetljivost na tzv. parazitska opterećenja,*
- *Zahtevaju hermetičku zaštitu, kako bi se izolovali od efekata vlage.*

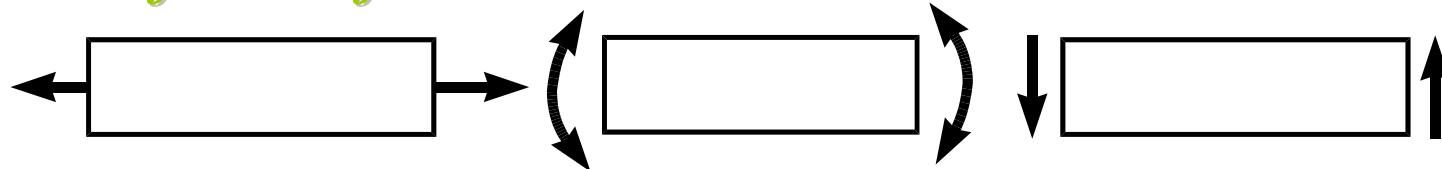
Davači na principu mernih traka

Analiza konstrukcija davača



Davači sile

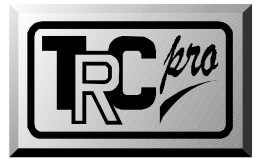
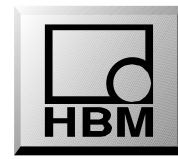
Sa čisto mehaničkog stanovišta, “elastični element” je najkritičniji. Relacija sila-deformacija mora biti linearna.



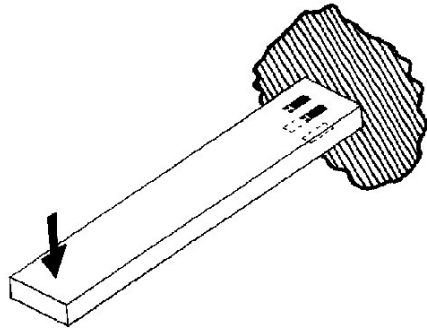
- *Visoka sopstvena frekvencija (velika krutost, mala masa)*
- *Izlazni signal nivoa 2mV/V tj. 1000µm/m deformacije*
- *Uniformna raspodela deformacije u na mernoj traci*
- *Isti nivo izl. signala u svim mernim trakama*
- *Maksimalna deformacija se javlja u okviru merne trake*
- *Jednodelna konstrukcija*
- *Jednostavna instalacija mernih traka*
- *Jednostavna geometrija (dobra tehnološkičnost)*
- *Zaštita od preopterećenja*
- *Neosetljivost na promenu napadne tačke opterećenja*
- *Mala pomeranja nakon opterećivanja (geometrijska nelinearnost)*
- *Uniformni raspored temperature unutar elastičnog elementa*

Davači na principu mernih traka

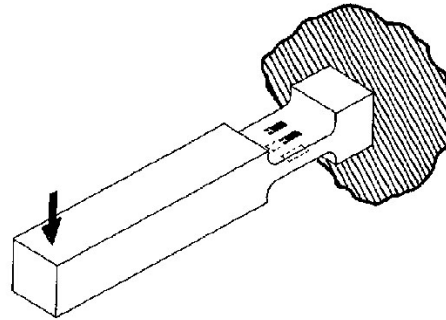
Analiza konstrukcija davača



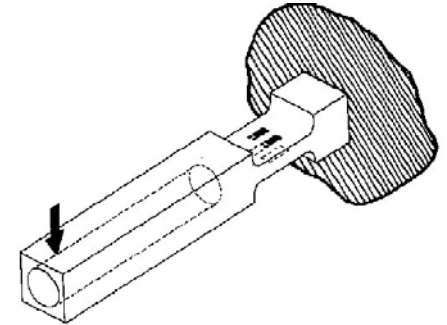
Svojni elementi



a)



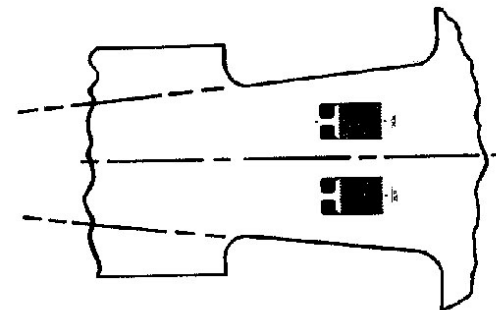
b)



c)

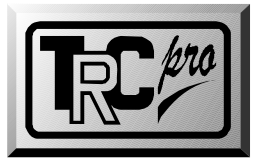
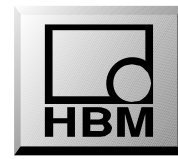
Slika a) prikazuje konzolno oslonjeni davač sile. Slika b) prikazuje usavršenu konstrukciju davača (koncentracija napona u zoni mernih traka, izvršena je redukcija pomeranja davača, a nivo deformacija je ostao nepromenjen). U izvedbi c) je postignuto smanjenje mase davača tj. povećana mu je sopstvena frekvencija.

Variranjem širine nosača postignuta je uniformna raspodela deformacija.



Davaci na principu mernih traka

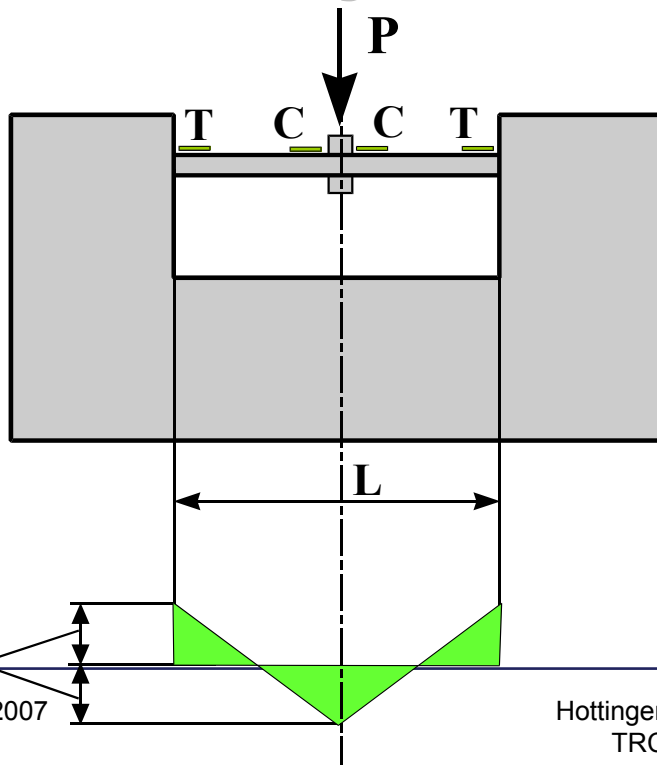
Analiza konstrukcija davača



Rezultat:

- *Konstrukcija davača je komplikovanija (u odnosu na početnu varijantu: slika a),*
- *Pojedini poželjni atributi davača i dalje nedostaju.*

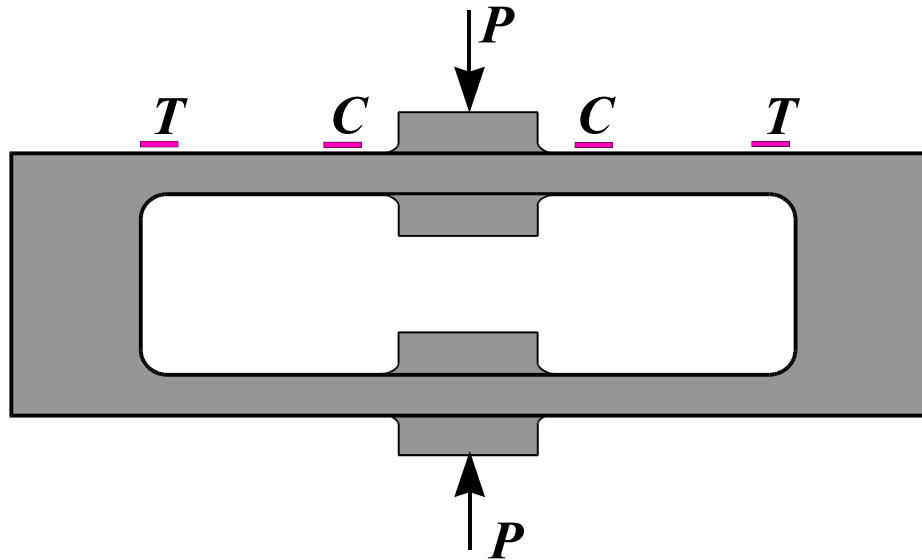
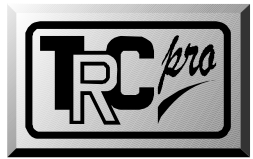
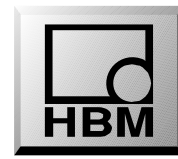
Kompleksni savojni elementi



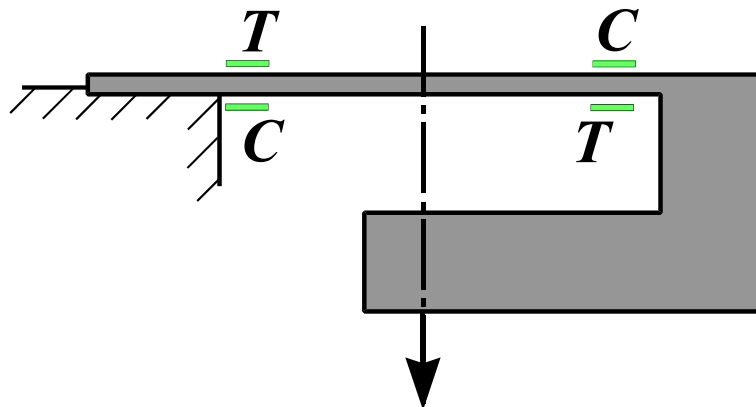
- *Visoka krutost davača,*
- *Pravolinijska putanja napadne tačke opterećenja,*
- *Postojanje membrane uzrokuje nelinearnost.*

Davaci na principu mernih traka

Analiza konstrukcija davača



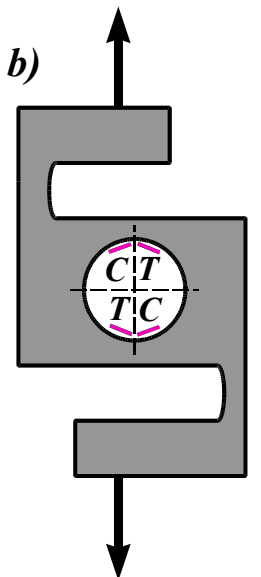
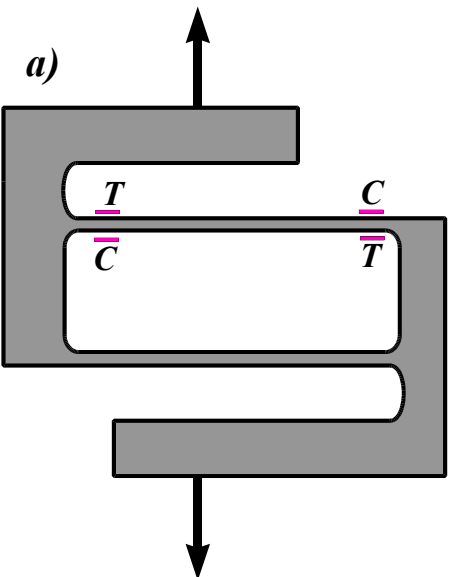
- *Eliminacija membranskog napona,*
- *Zaštita od preopterećenja.*



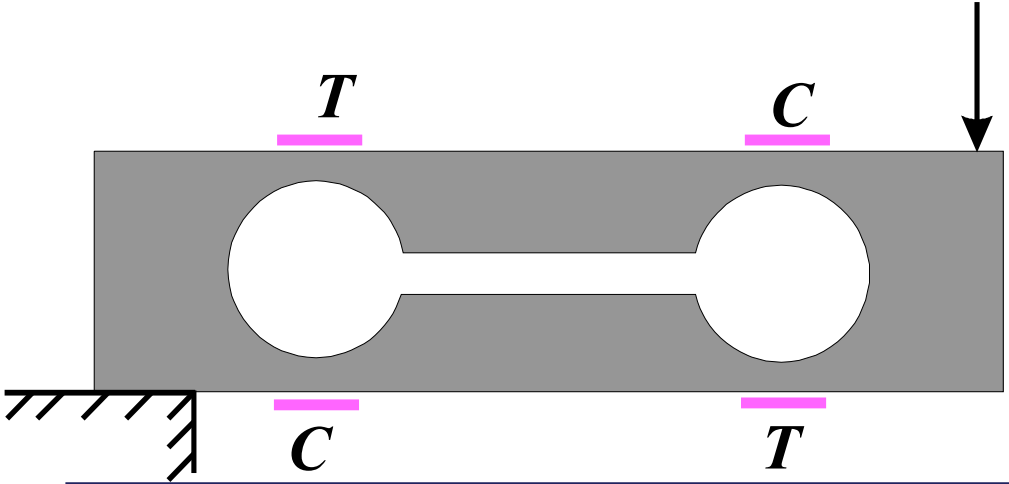
- *Princip dvostrukog savijanja,*
- *Znatna osetljivost na položaj napadne tačke opterećenja i njegov smer.*

Davaci na principu mernih traka

Analiza konstrukcija davača



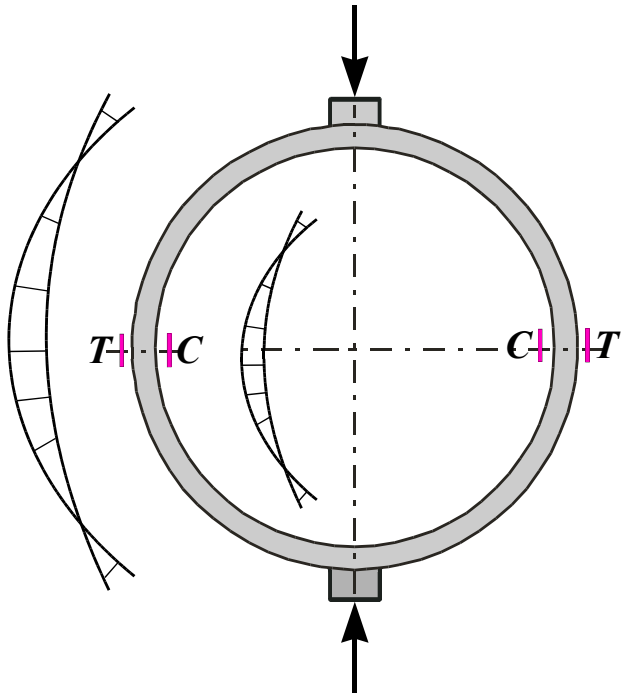
- *Simetričnost konstrukcije,*
- *Eliminisan je uticaj svih neaksijalnih opterećenja.*



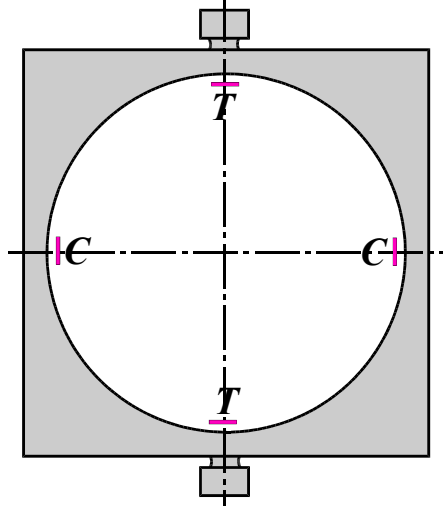
- *“Biokularni” elastični element*

Davači na principu mernih traka

Analiza konstrukcija davača

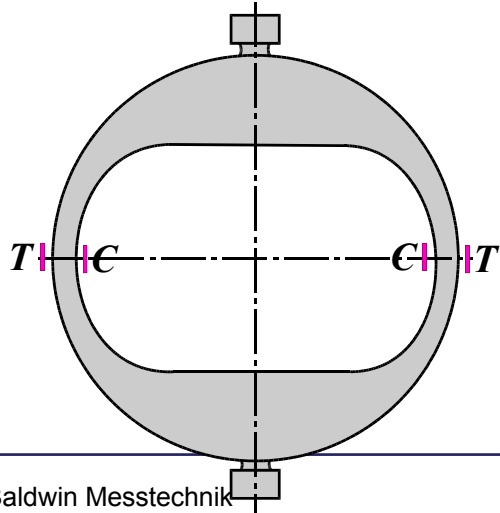


Prstenovi



Modifikacija 1

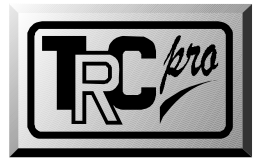
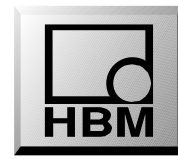
- Jednaostavna izrada
- Poboljšana linearnost



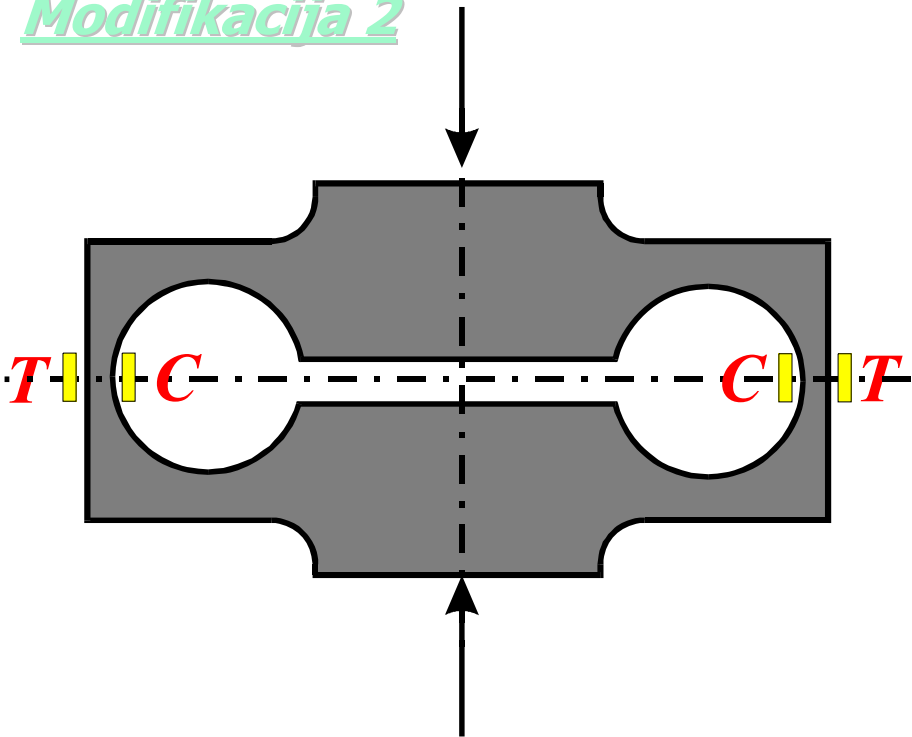
Davači u obliku prstenova daju uniformnu raspodelu deformacija u oblasti merne trake.

Davaci na principu mernih traka

Analiza konstrukcija davača

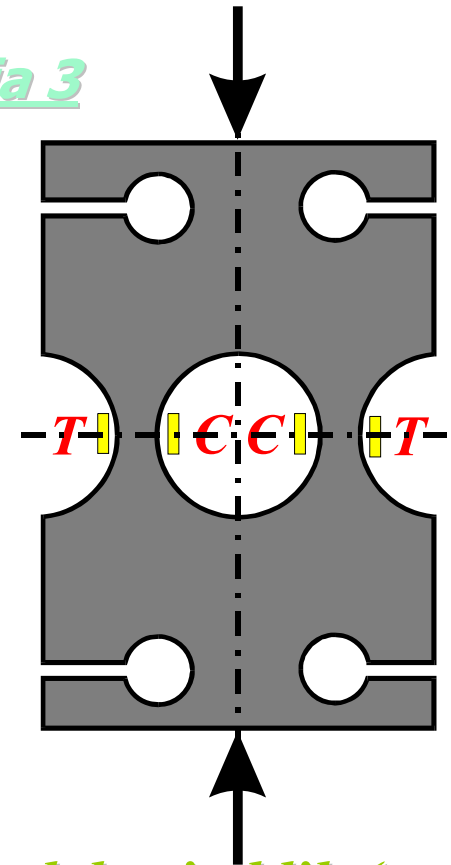


Modifikacija 2



- Deformacija usled aksijalno opterećenja i savijanja,
- Zaštita od preopterećenja.

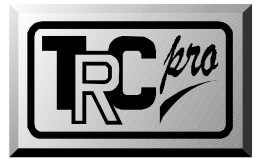
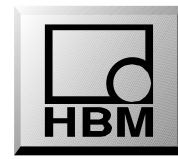
Modifikacija 3



- Kompleksni oblik (problemi u proizvodnji),
- Smanjena osetljivost na neaksijalna opterećenja..

Davači na principu mernih traka

Analiza konstrukcija davača



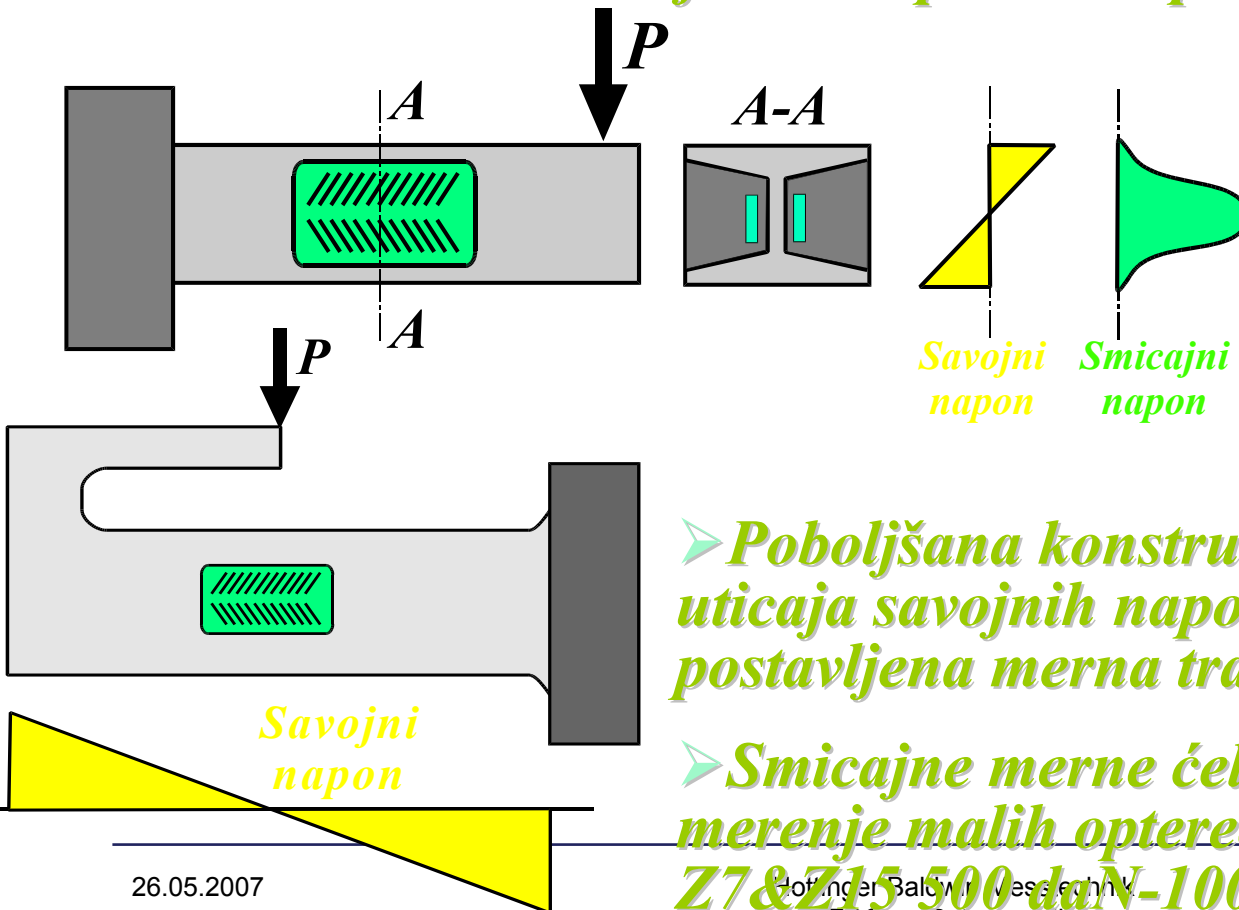
Smicajne merne ćelije

Prednosti:

➤ Mala pomeranja, odlična linearnost

➤ Mala osetljivost na promenu položaja opterećenja

➤ Redukcija uticaja savijanja pomoću odabira profila sa velikom savojnom krutošću (I-profil)

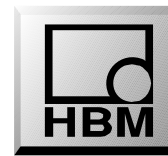


➤ Poboljšana konstrukcija putem eliminacije uticaja savojnih napona u oblasti gde je postavljena merna traka

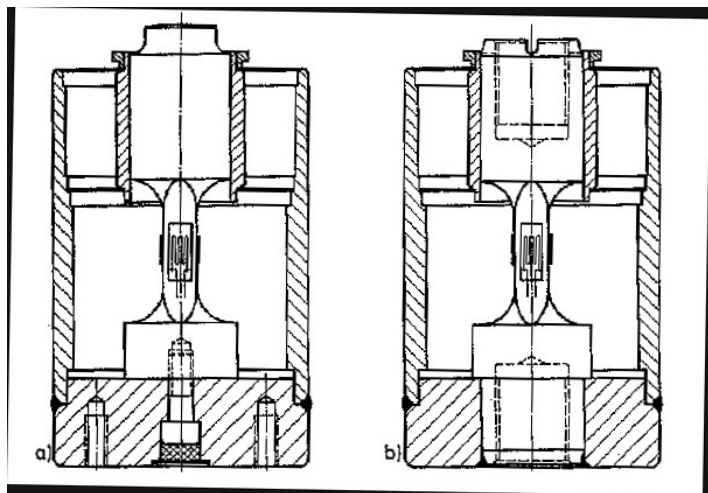
➤ Smicajne merne ćelije nisu pogodne za merenje malih opterećenja. Tip HBM Z7&Z15 500 daN-1000 kN.

Davači na principu mernih traka

Analiza konstrukcija davača

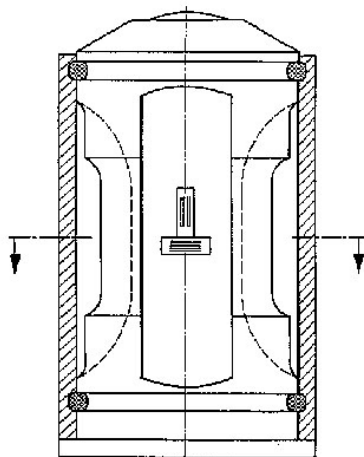


Aksijalno opterećene ćelije

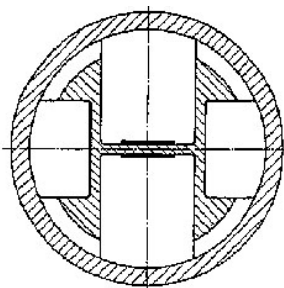


- *Jednostavna konstrukcija,*
- *Pogodne za velika opterećenja.*

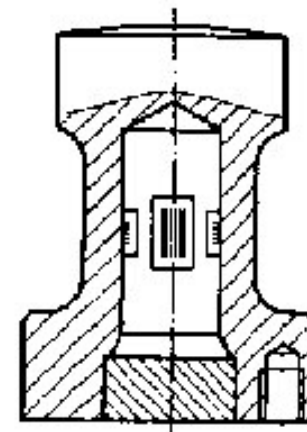
Da bi se redukovali efekti prouzrokovani usled uticaja savojnih napona, koriste se davači u obliku tankozidnih cilindara, sa poprečnim presekom H oblika.



26.05.201



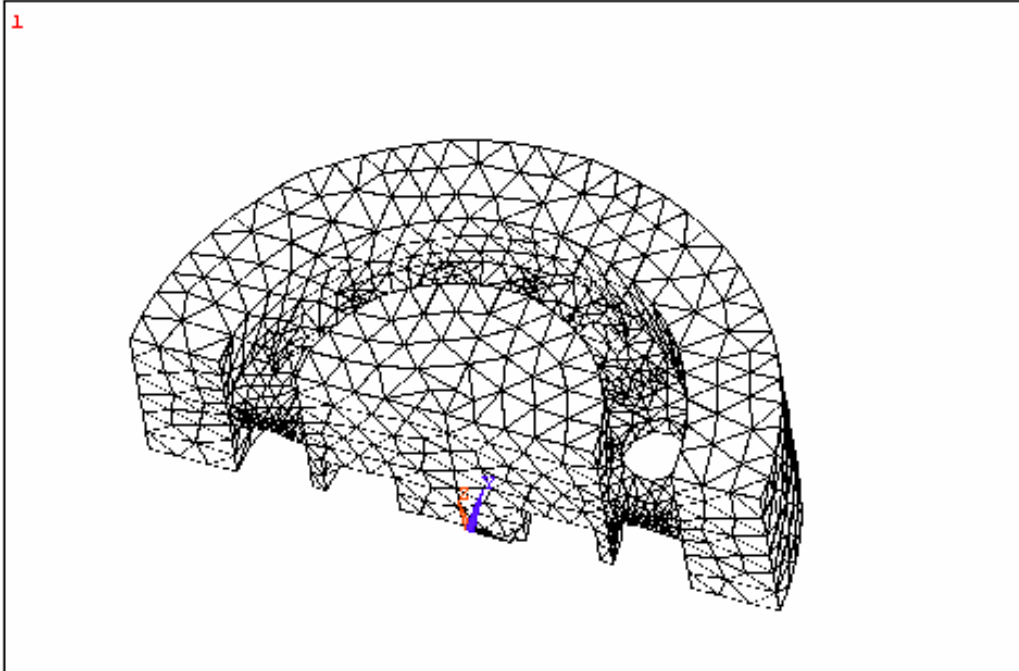
Hottinger Baldwin Messtechnik
TRCpro Petrovaradin



otimir Ličen

Davaci na principu mernih traka

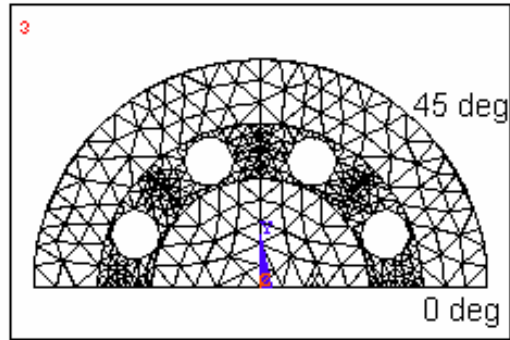
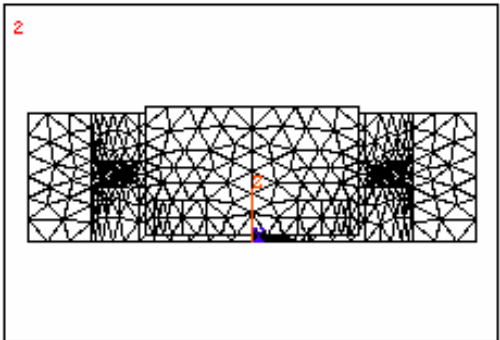
Proračun davača - MKE (ANSYS 5.3)



```
ANSYS 5.3
NOV 21 1996
22:19:33
ELEMENTS
TYPE NUM

XU =.2774
YU =-.5063
ZU =.8165
*DIST=81.658
*YF =41
*ZF =24.5
A-ZS=-24.13
Z-BUFFER

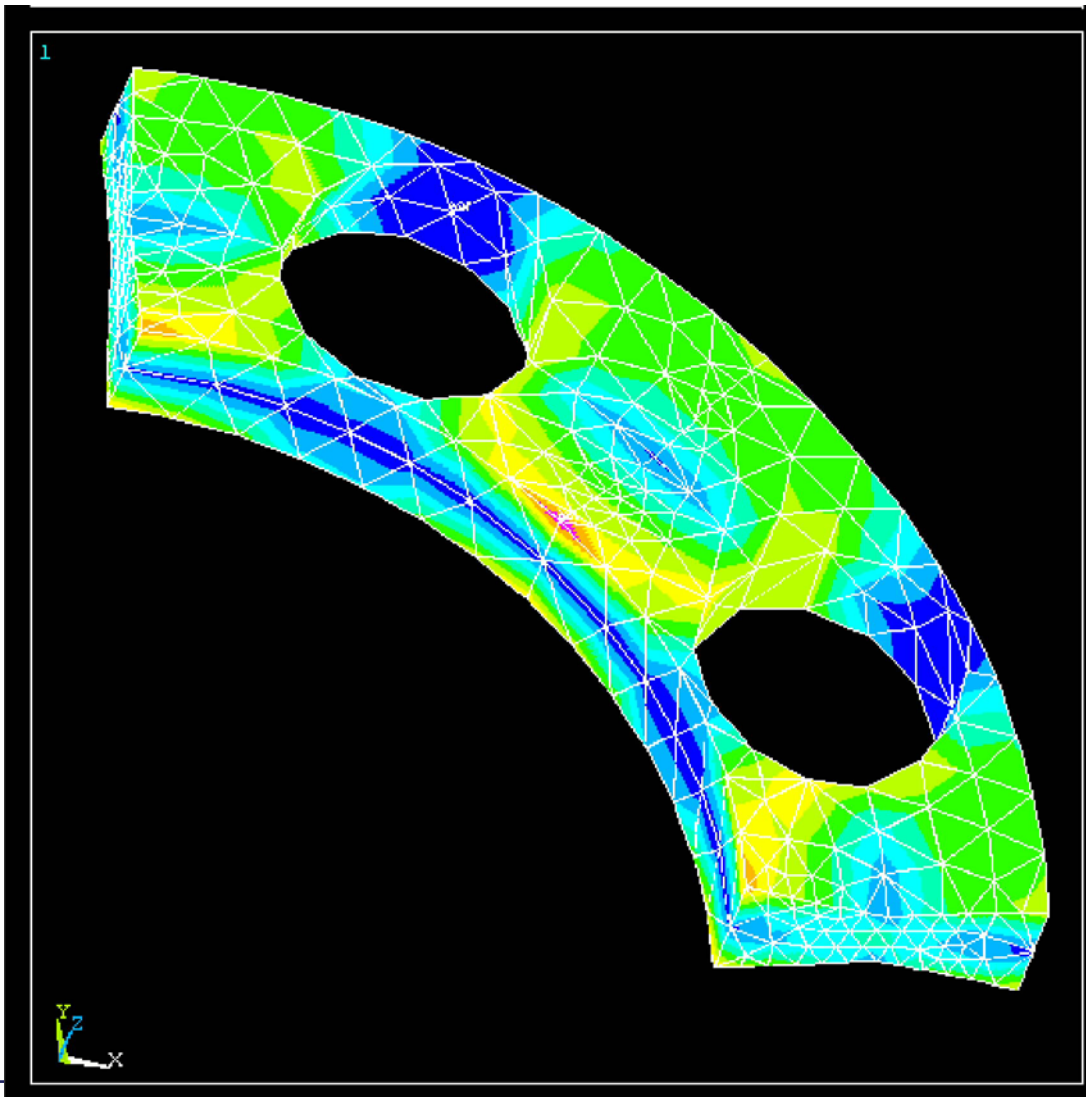
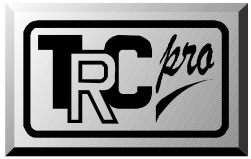
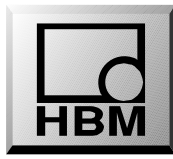
WIND=2
YU =-1
DIST=61.575
YF =41
ZF =24.5
Z-BUFFER
```



```
WIND=3
ZU =1
DIST=60.643
YF =41
ZF =24.5
Z-BUFFER
```

Davači na principu mernih traka

Proračun davača - MKE (ANSYS 5.3)



```
ANSYS 5.3  
MAY 14 1997  
10:54:11  
NODAL SOLUTION  
STEP=1  
SUB =1  
TIME=1  
SEQV (AVG)  
TOP  
DMX =.257304  
SMN =19.363  
SMX =587.876  
SMXB=771.115
```

Blue	19.363
Light Blue	82.531
Cyan	145.699
Green	208.867
Light Green	272.035
Yellow	335.203
Orange	398.371
Red-Orange	461.54
Red	524.708
Dark Red	587.876

26.05.2007

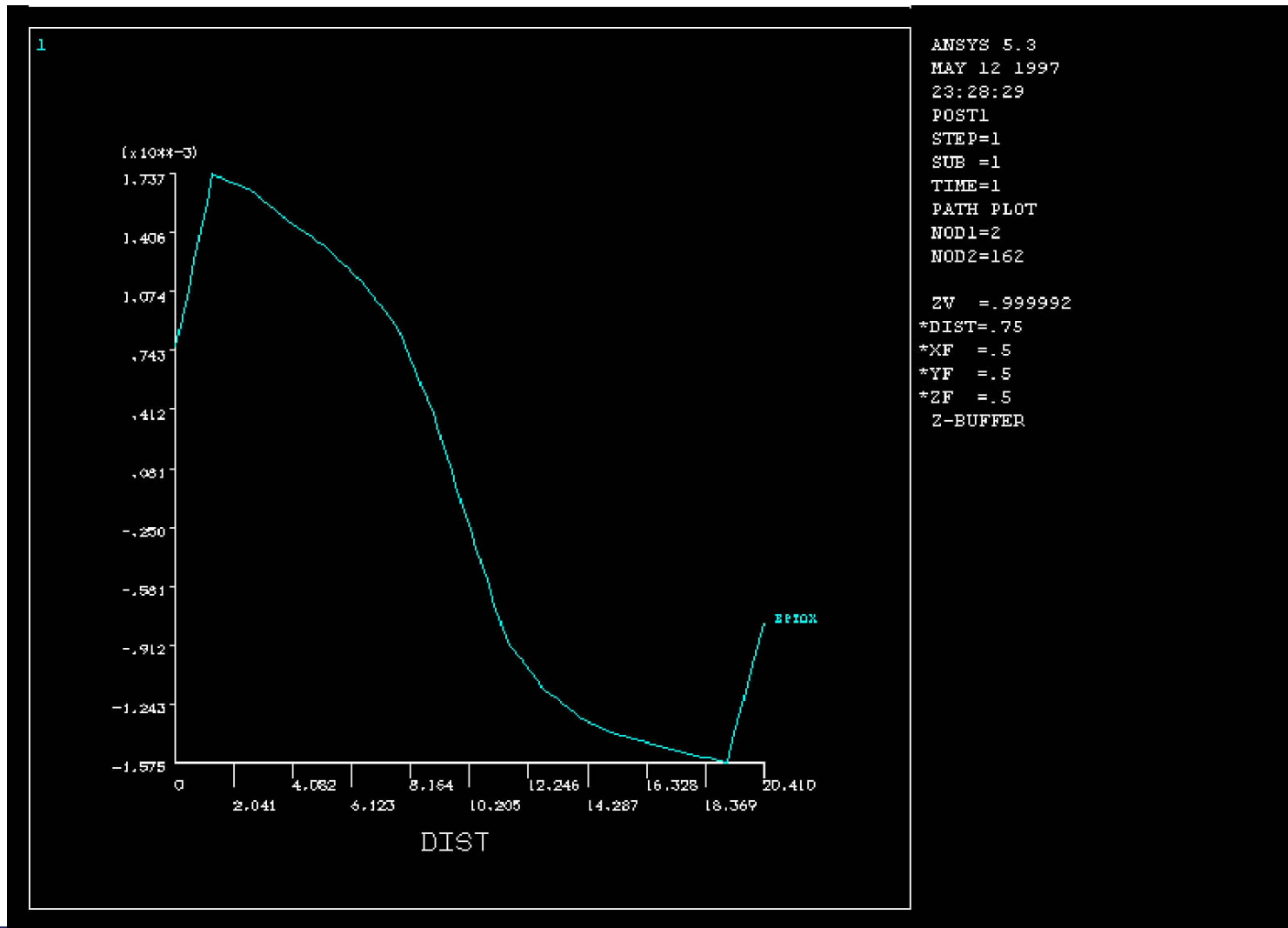
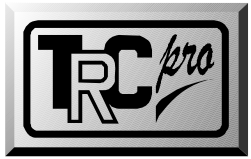
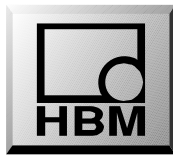
Von Mises-ovi naponi na elastičnom elementu davača

Hottinger Baldwin Messtechnik

dr. Hotimir Ličen

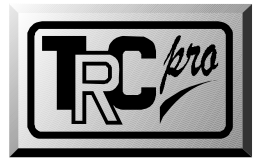
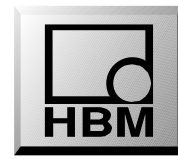
Davači na principu mernih traka

Proračun davača - MKE (ANSYS 5.3)



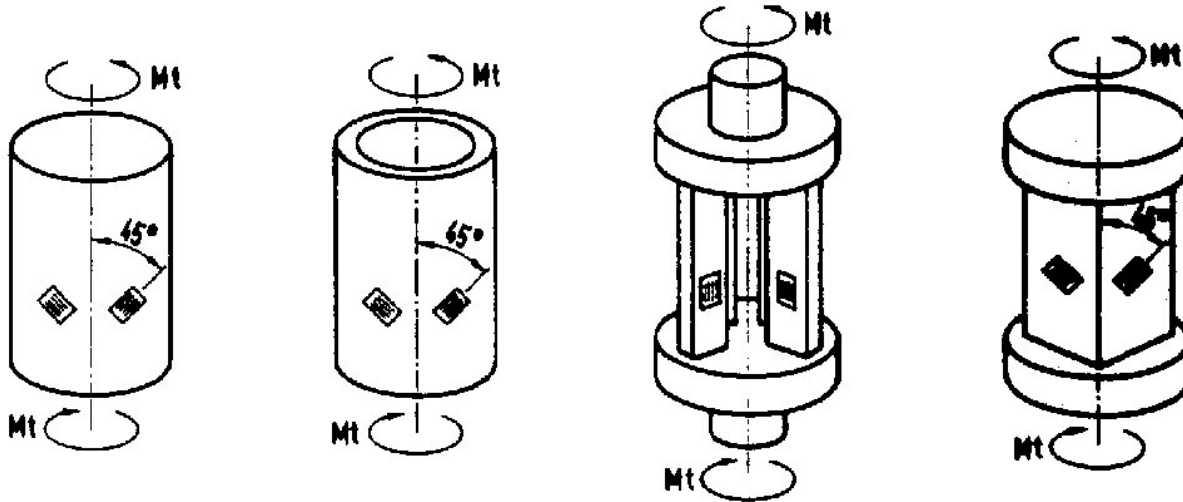
Davači na principu mernih traka

Analiza konstrukcija davača



Davači momenta

Davači momenta na bazi mernih traka služe za merenje glavnih deformacija nastalih usled obrtnog momenta.



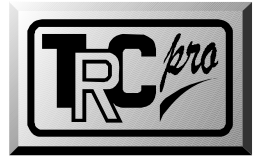
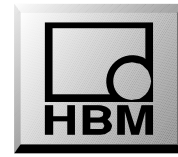
➤ *Davači momenta u obliku punog vratila služe za merenje velikih momenata.*

➤ *Davači u izvedbi tankozidnih vratila imaju veće savojne krutosti u odnosu na puna vratila.*

➤ *Za merenje malih momenata, tankozidni davači "krstastog" poprečnog preseka daju visok nivo deformacija i visoku savojnu krutost.*

Davači na principu mernih traka

Analiza konstrukcija davača



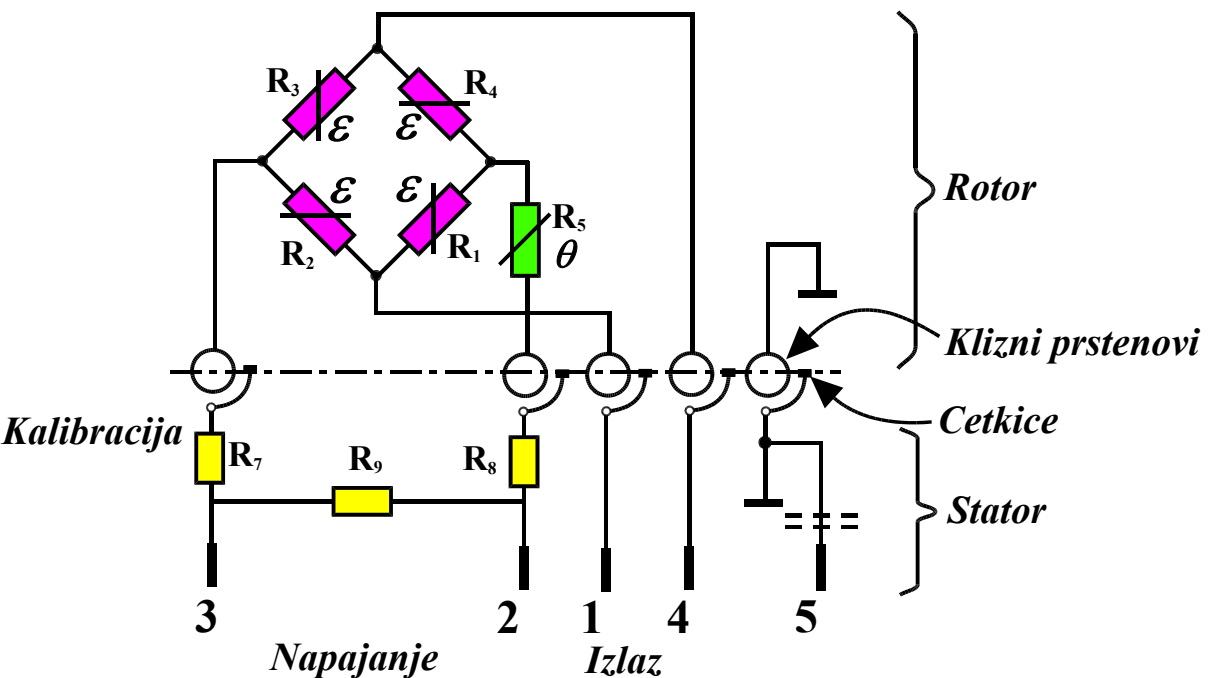
26.05.2007

Hottinger Baldwin Messtechnik
Davač obrtnog momenta - HBM

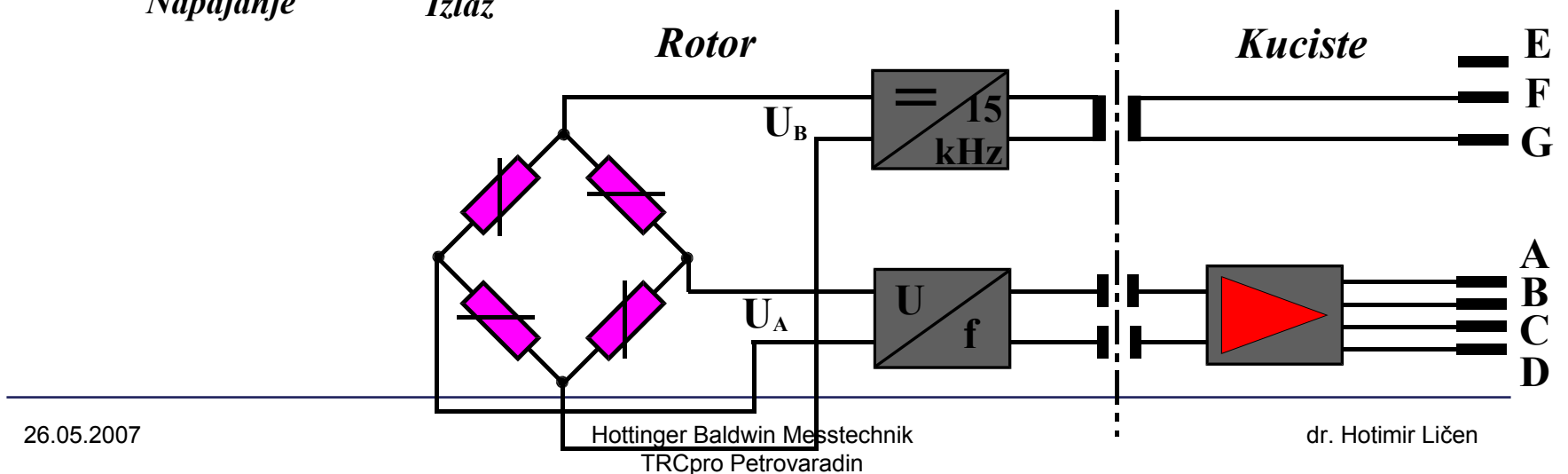
dr. Hotimir Ličen

Davači na principu mernih traka

Analiza konstrukcija davača



Sistem
transmisije
signala



Davači na principu mernih traka

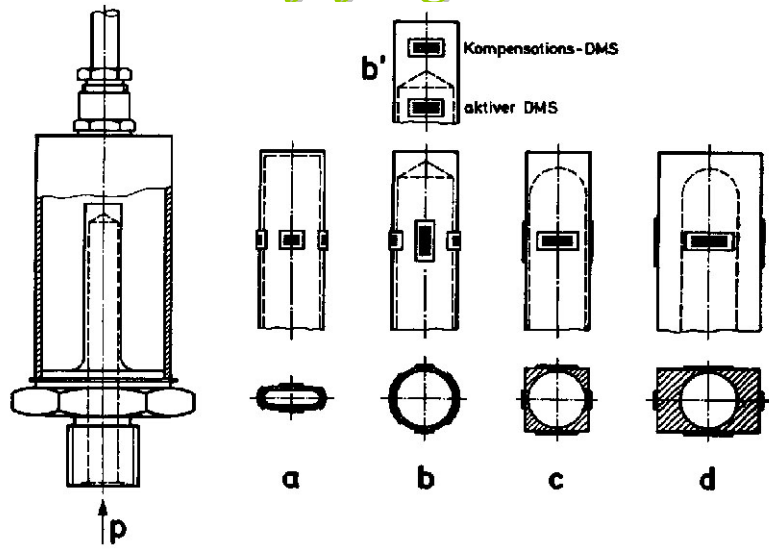
Analiza konstrukcija davača



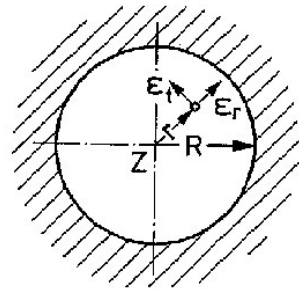
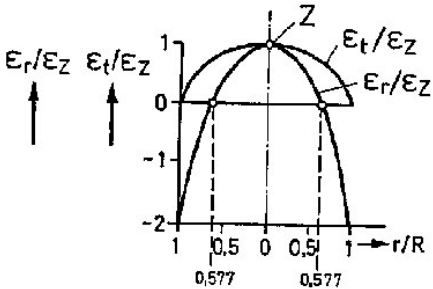
Davači pritiska

Davači pritiska koriste dva tipa elastičnih elemenata:

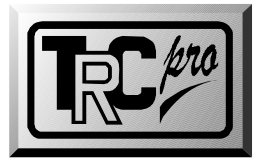
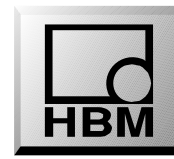
- Cevastu formu el. elementa,
- Elast. elemente oblika dijafragme



I tangencijalni i aksijalni naponi su pozitivni, mada različitog nivoa i tako dajući mali izlazni signal.



26.05.2009.



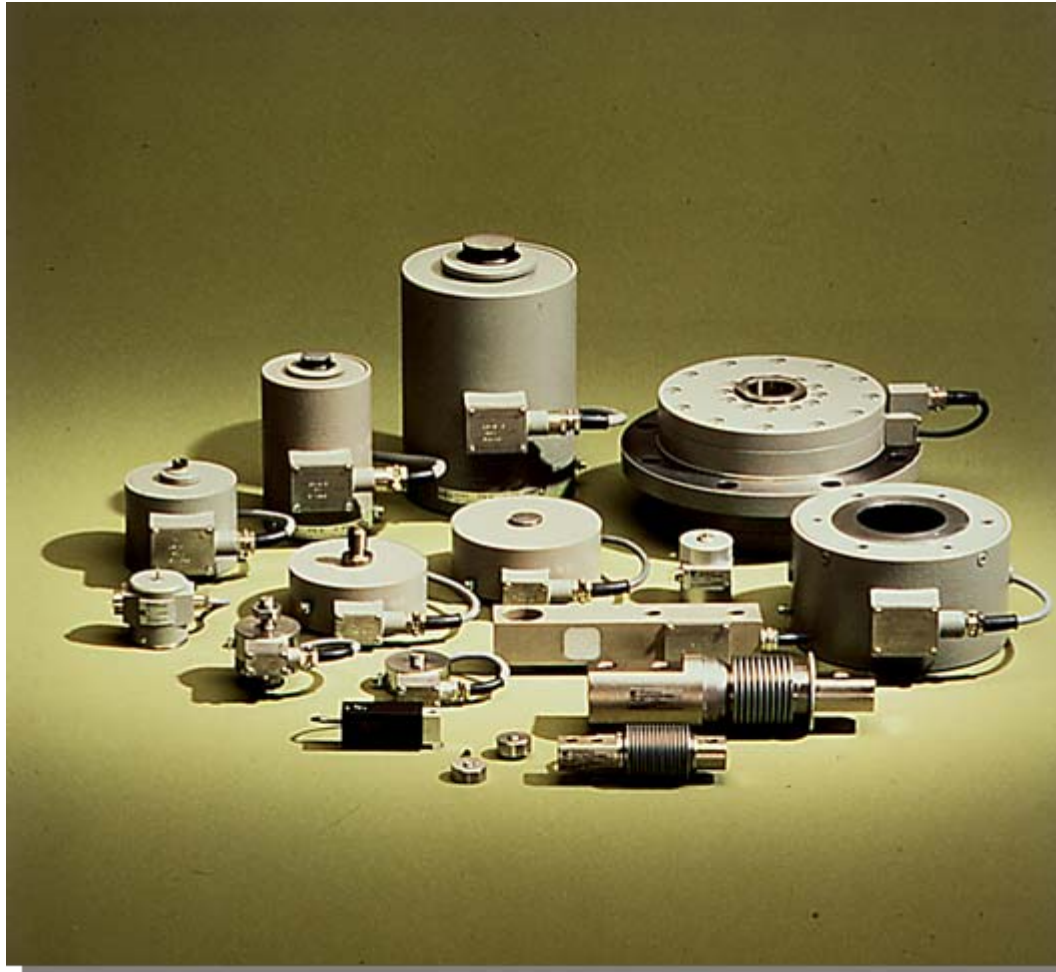
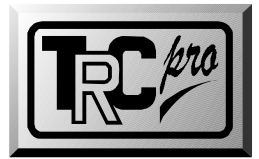
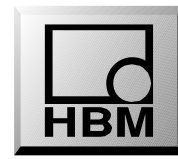
Izbor materijala davača

Osnovni zahtevi:

- *Sitnozrna, homogena struktura,*
- *Visoka elastična deformabilnost, linearnost i tačka tečenja,*
- *Malo puzanje, tj. nepostojanje promene deformacije čak i za dugotrajna opterećenja (“prilagođavanje puzanju”),*
- *Mala histereza,*
- *Dobra temperaturna provodljivost,*
- *Mali temperaturni koeficijent Young-ovog modula elastičnosti,*
- *Dobra obradivost*

Davači na principu mernih traka

Analiza konstrukcija davača



26.05.2007

Hottinger Baldwin Messtechnik
Familija davača sile/mase - HBM

dr. Hotimir Ličen

Davaci na principu mernih traka

Analiza konstrukcija davača



U tabeli koja sledi, dat je pregled uobičajno korišćenih materijala za proizvodnju elastičnih elemenata, kao i njihove karakteristike.

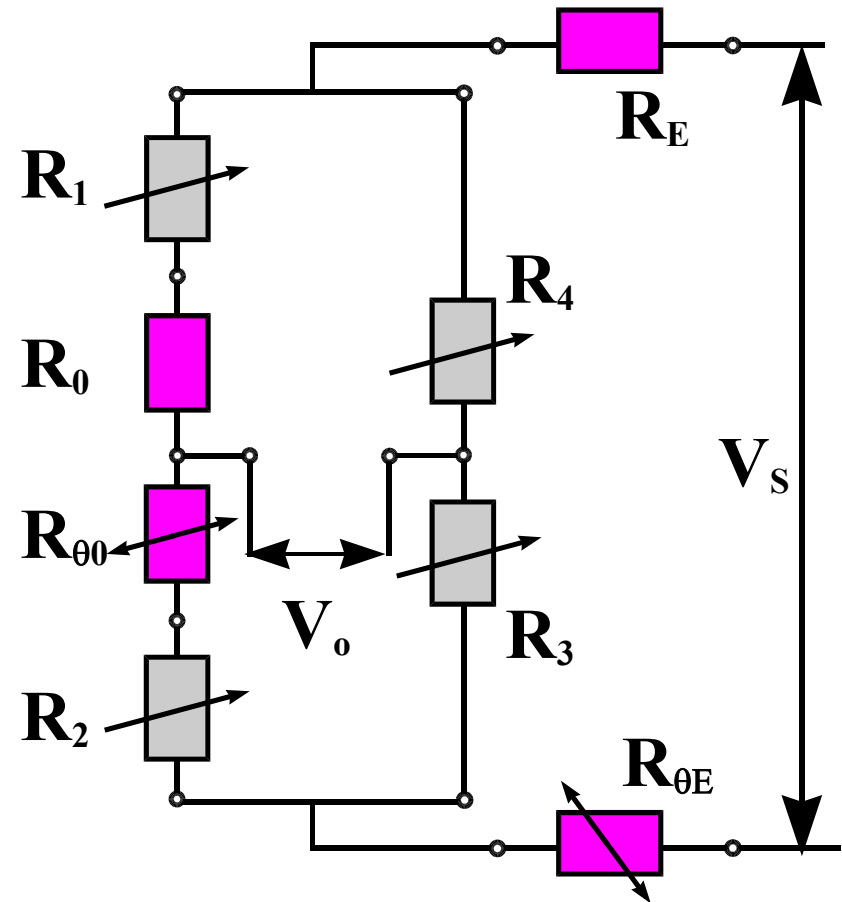
Nemetalni materijali u ovom kontekstu nisu bitni te tako nisu ni navedeni u tabeli.

	Oznaka	Broj materijala	Moduo elastičnosti (N/mm ²)	Temper. koeficijent modula elastičnosti	Koeficijent termičkog širenja	Napomene
<i>Čelik za opruge</i>	51 CrV4	1,2241	210000	-26	11	Korodira
<i>Čelik za opruge</i>	X5CrNiCu Nb1744	1,4584	207000	-19	11	Nerđajući čelik
<i>Bakar-Berilijum</i>	CuBe	2,1247	130000	-35	17	-
<i>Aluminijum</i>	AlCuMg ₂	3,1355	73000	-58	23	-

Konstrukcija kola

Električno kolo u davaču mora da iskompenzuje sledeće uticaje:

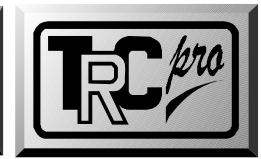
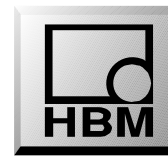
- *pomeranje nule usled promene temperature (TC_o)*
- *početni debalans mosta*
- *zavisnost osetljivosti davača od temperature (TC_c)*
- *podešavanje osetljivosti i nominalne vrednosti davača.*



*Sve se ovo postiže primenom uvođenjem tzv. **fiksni**h ili **temperaturno osetljivih** otpornika u **Wheatston-ov** most.*

Davaci na principu mernih traka

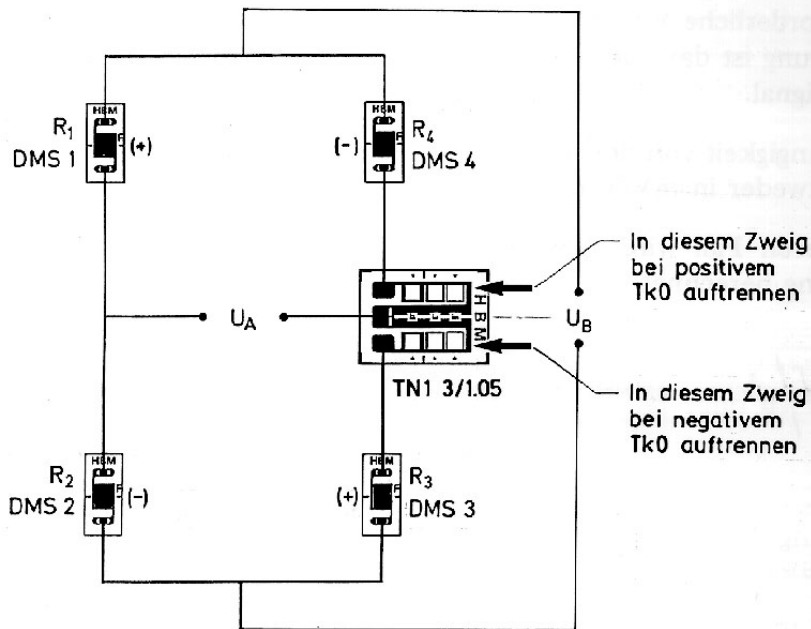
Analiza konstrukcija davača



Kompenzacija pomeranja nule usled promene temperature

- Pojava pomeranja nule nastaje usled nesimetrije komponenti temperaturno osetljivih otpornika unutar mosta (priključni terminali, temperaturne karakteristike mernih traka itd)
- Kompenzacija se ostvaruje uvođenjem dodatnog temperaturno osetljivog otpornika u granu most, obično od bakra ili nikla)
- Otpornik obično mora imati istu zavisnost od temperature kao i asimetrija koja dovodi do pojave zavisnost nula signala od temperature.

Sračunavanje otpora za kompenzaciju "drift"-a nule:

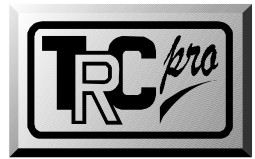
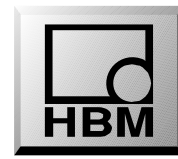


$$R_{TN1} = 2 \cdot \frac{\varepsilon \cdot R_{sg}}{\Delta t \cdot TC_{TN1}}$$

TC_{TN1} -temperaturni koeficijent kompenzatorskog otpornika

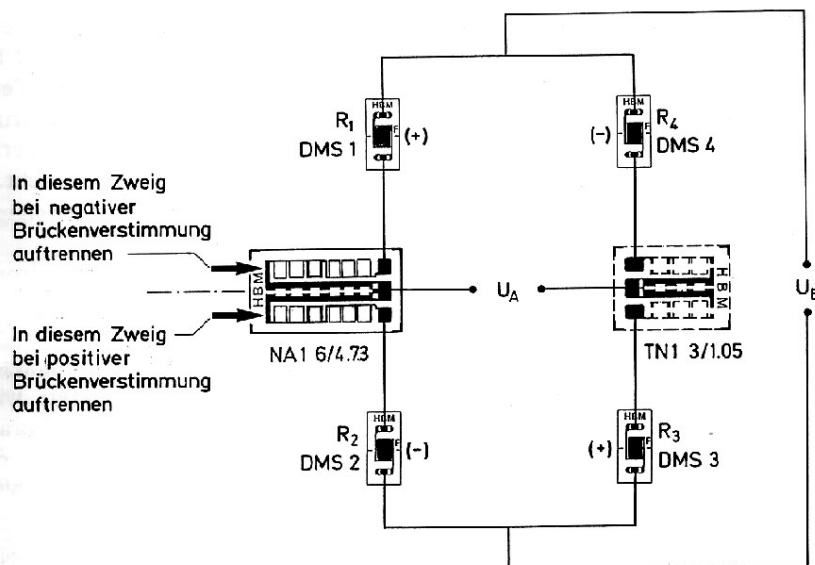
Davaci na principu mernih traka

Analiza konstrukcija davača



Kompenzacija početnog debalansa mosta

- Početni debalans mora biti uklonjen,
- Debalans je prouzrokovan zbog asimetrije nastale
 - usled povezivanja na priključne terminale,
 - usled nejednakosti karakteristika mernih traka,
 - usled nesimetrije nastale postavljanjem otpornika za kompenzaciju "drifta" nule usled promene temperature
- Korekcija se vrši umetanjem temperaturno neosetljivog otpornika (ili otpornika sa istim temperaturnim koeficijentom kao i merna traka, npr. konstantan)

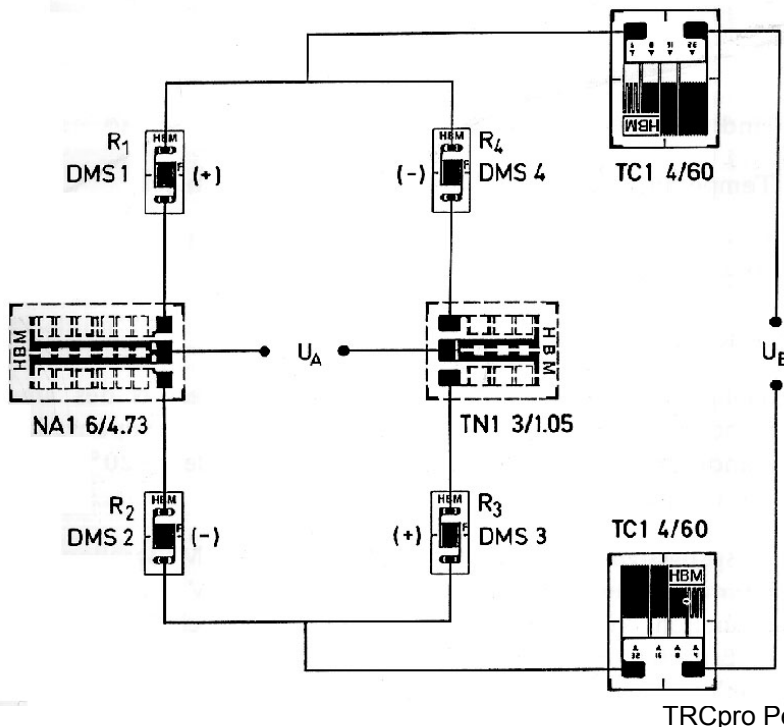


$$R_{NA1} = 2 \cdot \varepsilon \cdot R_{sg}$$

R_{sg} -otpor merne trake

Kompenzacija zavisnosti osetljivost davača od temperature

- **Temperaturna zavisnost nastaje zbog**
 - Zbog temperaturne zavisnosti Young-ovog modula elastičnog elementa
 - Temperaturne zavisnost k-faktora merne trake
- **Kompenzacija se postiže umetanjem temperaturno osetljivog otpornika u** *uvodne vodove mosta.*
- **Napajanje mosta se smanjuje sa povećanjem temperature.**



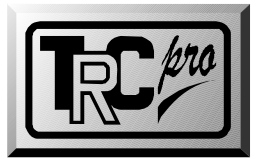
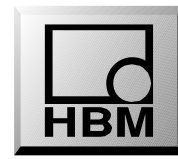
$$R_{TC1} = \frac{\Delta R_{\theta}}{TK_{TC1} \cdot \Delta \theta}$$

ΔR - temperaturno zavisna promena otpora

TK_{TC1} -temperaturni koeficijent kompenzatorskog otpora

Davači na principu mernih traka

Analiza konstrukcija davača



Podešavanje osetljivosti davača

- Davači su obično tako konstruisani da proizvode $2mV/V$ izlaznog signala pri nominalnom opterećenju ($\approx 1000\mu m/m$ deformacije objekta ispitivanja).
- Elastični element bi trebao biti tako dimenzionisan da u neizbalansiranom stanju pod nominalnim opterećenjem proizvodi signal veći od $2mV/V$, npr. $2.4mV/V$).
- Izlazni signal se doteruje umetanjem **fiksnog otpornika sa niskim temperaturnim koeficijentom** u izlazne vodove.

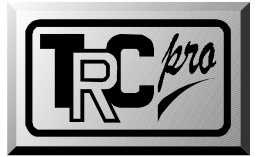
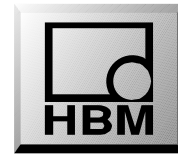
R_E -Zahtevani otpor za balansiranje

R_B - otpor mosta

K_1 -Osetljivost davača pre balansiranja

K_2 - Osetljivost davača nakon balansiranja

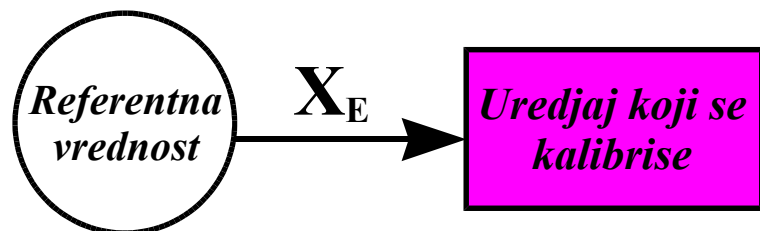
$$R_E = R_B \cdot \left(\frac{K_1}{K_2} - 1 \right)$$



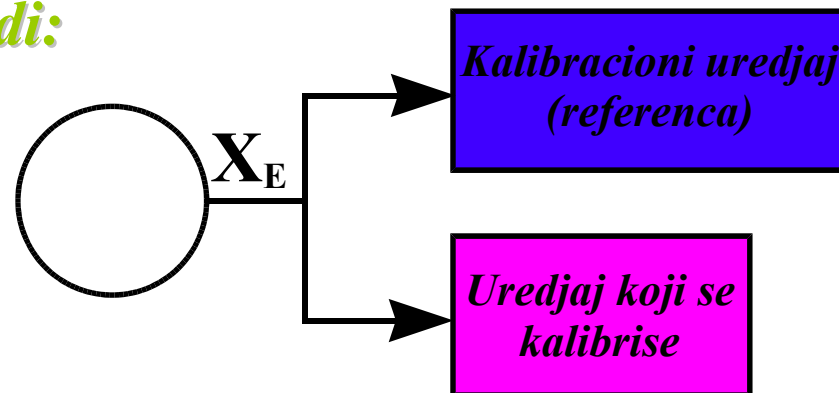


KALIBRACIJA – MERNOG SISTEMA SA MERNIM TRAKAMA

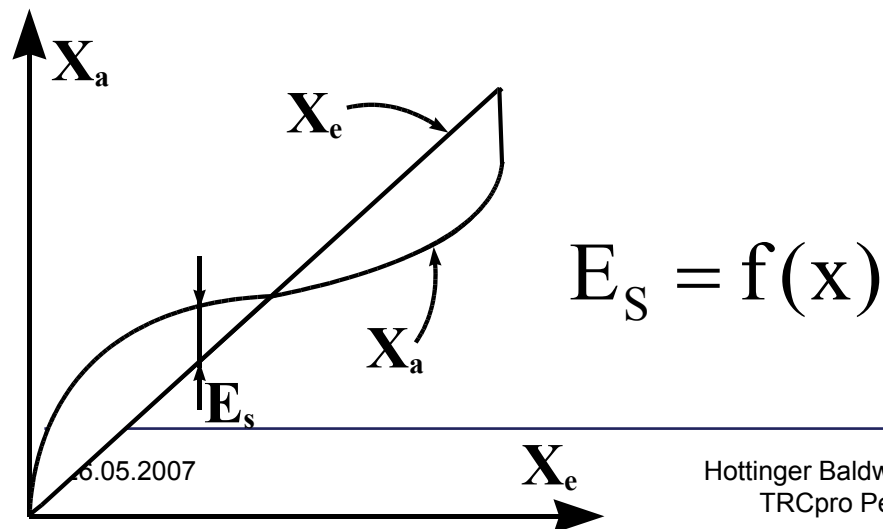
Eliminacija sistematske greške se postiže postupkom kalibracije. Za razliku od slučajne greške, sistematska greška ima definisan znak i ponovljiv karakter. Kalibracija se izvodi:



korišćenjem poznate, referentne vrednosti



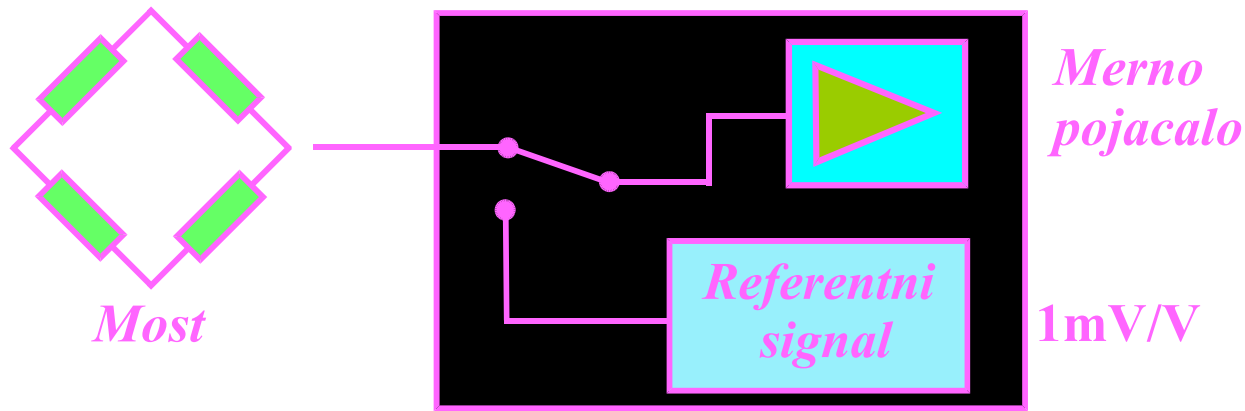
korišćenjem uređaja za kalibraciju



Kalibracija, po pravilu mora da obuhvati kompletan merni opseg uređaja. Takođe, ona mora biti izvedena samo po određenim uslovima okoline.

a) Kalibracija primenom internog kalibracionog signala iz mernog pojačala

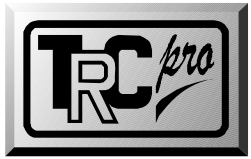
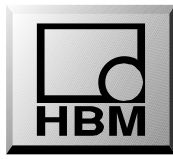
Merno kolo se napaja sa prethodno definisanim signalom.



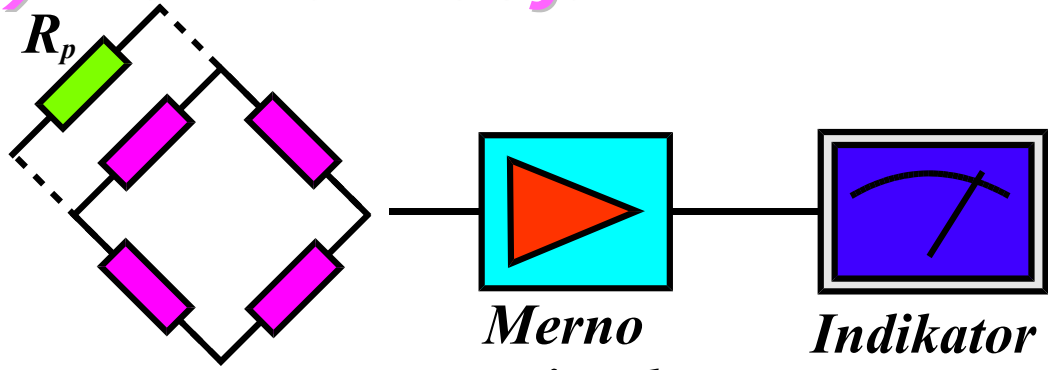
Bitno: $1 \text{ mV/V} = Z_6/10t = 5t$

Osnovne karakteristike:

- nepostojanje kompenzacije gubitka osetljivosti usled provodnika
- prilagođavanje pojačanja A



b) Shunt kalibracija



R_p - paralelni otpor
 R - otpor merne trake
 R_r - ukupan otpor

Most

Merno pojačalo

Indikator

$$\frac{V_0}{V_S} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1}, \quad R_r = \frac{R \cdot R_p}{R + R_p} \quad \Rightarrow \quad \frac{V_0}{V_S} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{4} \cdot \frac{R_r - R}{R} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{R_p}{R + R_p} - 1 \right)$$

$$R_p \gg R \quad \Rightarrow \quad \varepsilon^* = \frac{1}{k} \left(\frac{R_p}{R + R_p} - 1 \right) \cdot 10^6$$

Za npr. $R=120\Omega$, $R_p=120k\Omega$, $k=2$ \Rightarrow

$$\varepsilon^* = \frac{1}{2} \left(\frac{120000}{120 + 120000} - 1 \right) \cdot 10^6 \approx -500 \mu\text{m} / \text{m}$$

Ovom metodom su uzete u obzir sve veličine kalibracije. Nisu uzete u obzira samo mehaničke karakteristike samog pretvarača.

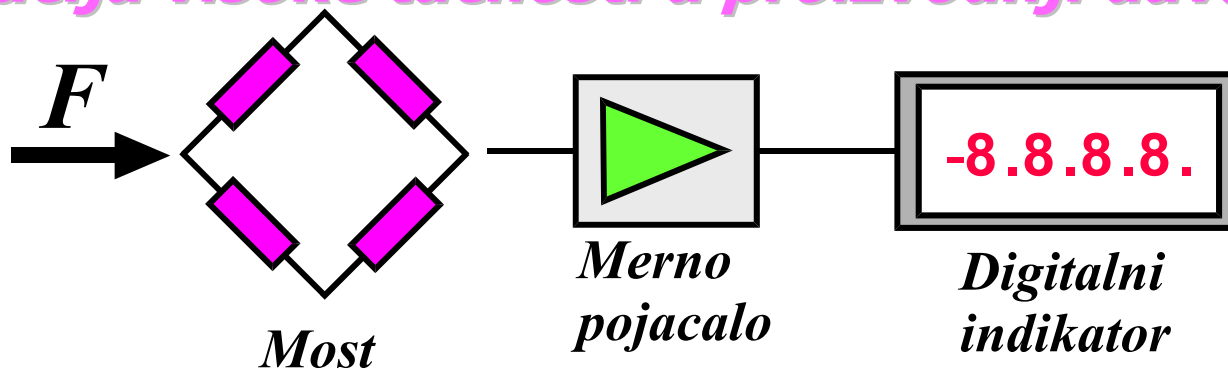
C) Kalibracija primenom kalibracione jedinice

Primenjuje se za kalibraciju kompletnog mernog lanca.

Mreža visoko preciznih otpornika simulira debalans mosta koji stiže sa mernog pretvarača

- Tačnost 0.025% za tip K3607*
- Efekti kablova su iskompenzovani*

d) Kalibracija visoke tačnosti u proizvodnji davača

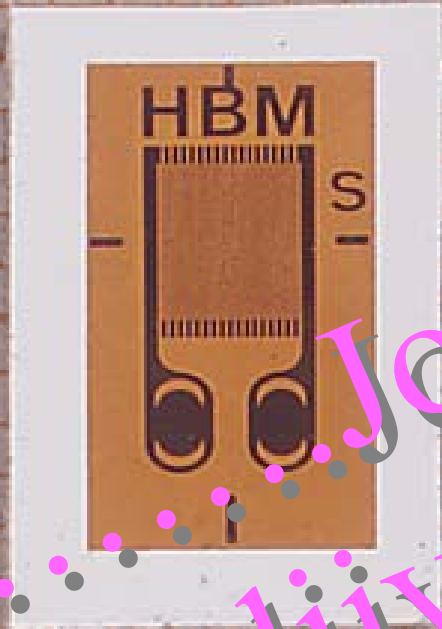


- Nije adekvatna u eksperimentalnoj analizi naponskog stanja*

- Kompenzuje uticaje svih članova mernog lanca, uključujući i merni pretvarač (davač)*

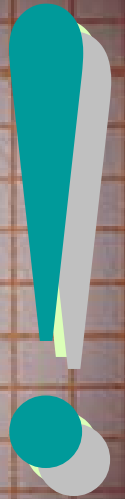
I posle 60 godina:

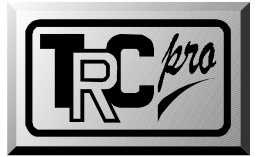
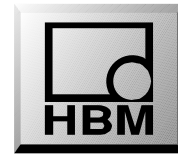
Moderno...



Još uvek

nezamenljivo...





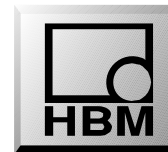
MERNA POJAČALA I PRIMENA KOD MERNIH TRAKA

Uloga mernog pojačala

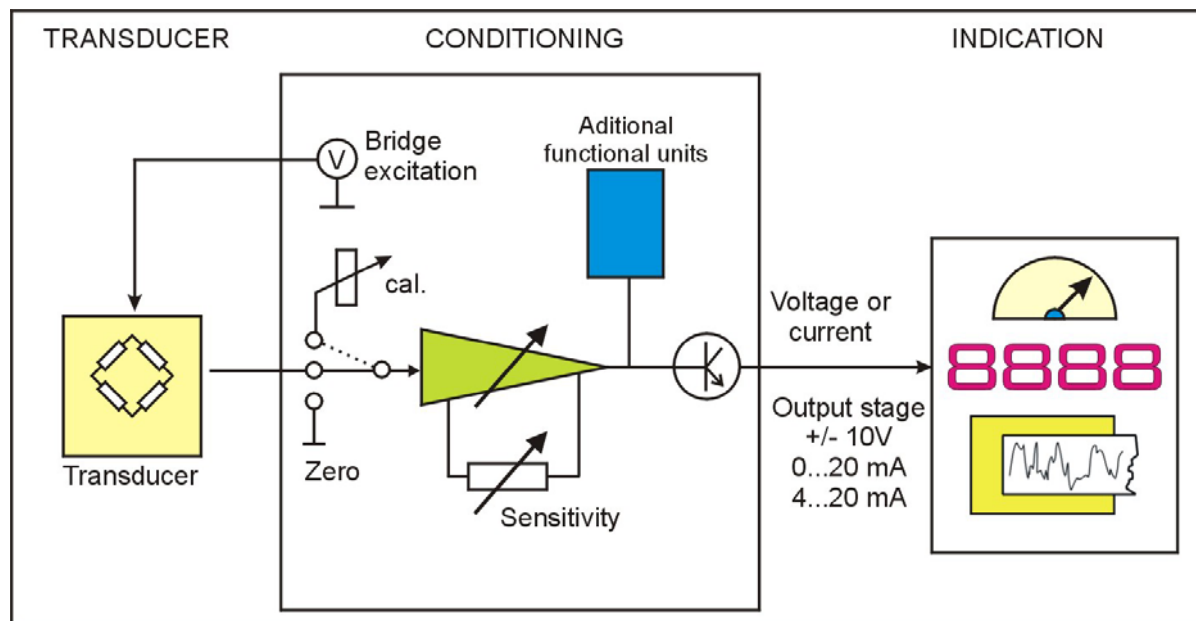
- *Merna traka je pasivan merni sistem*
- *Signal sa mosta je u mV/V*
- *Na pr.: pri napajanju od 5V, pri $2mV/V$, signal iznosi 10mV pri punom opsegu (opterećanju)!*
- *POTREBNO je pojačanje!!*
- *POTREBNO JE napajanje pretvarača*
- *POTREBNO JE podešavanje osetljivosti*
- *POTREBNO JE balansiranje mosta*
- *POTREBNA JE interna kalibracija*
- *POTREBNA je kompenzacija u 1/2 i 1/1 mostu*

Merna pojačala

Opšta struktura



Blok šema klasičnog analognog pojačala



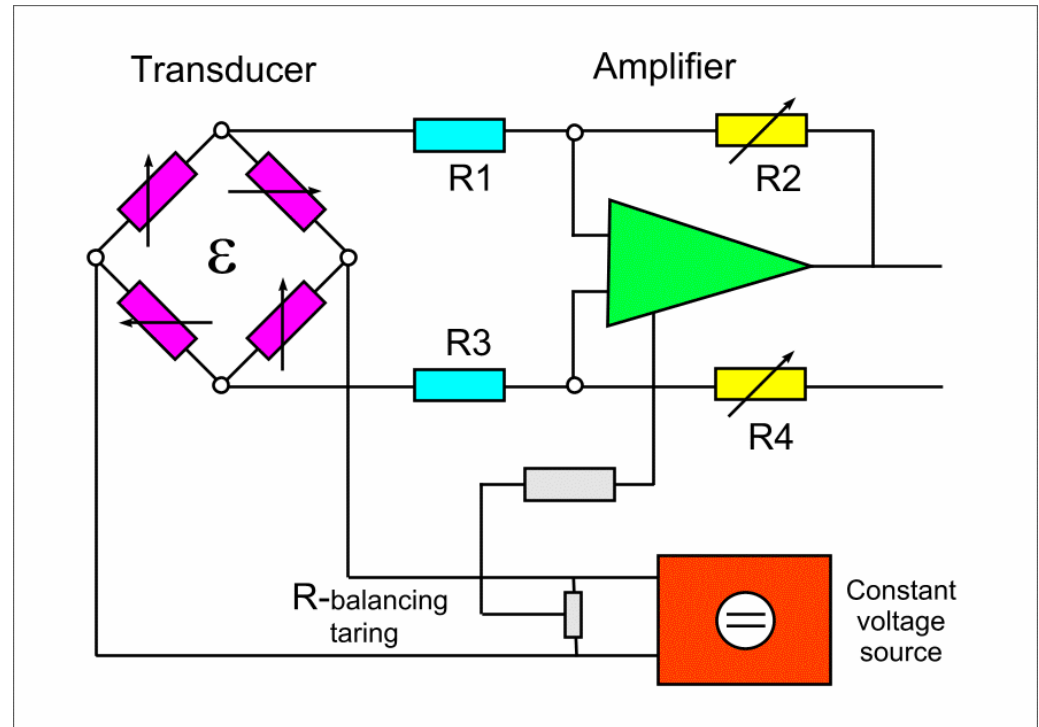
Funkcije pojačala:

- ***Napajanje mosta***
- ***Podešavanje nule (Balansiranje)***
- ***Podešavanje pojačanja***
- ***Kalibracija***

Dodatne funkcije:

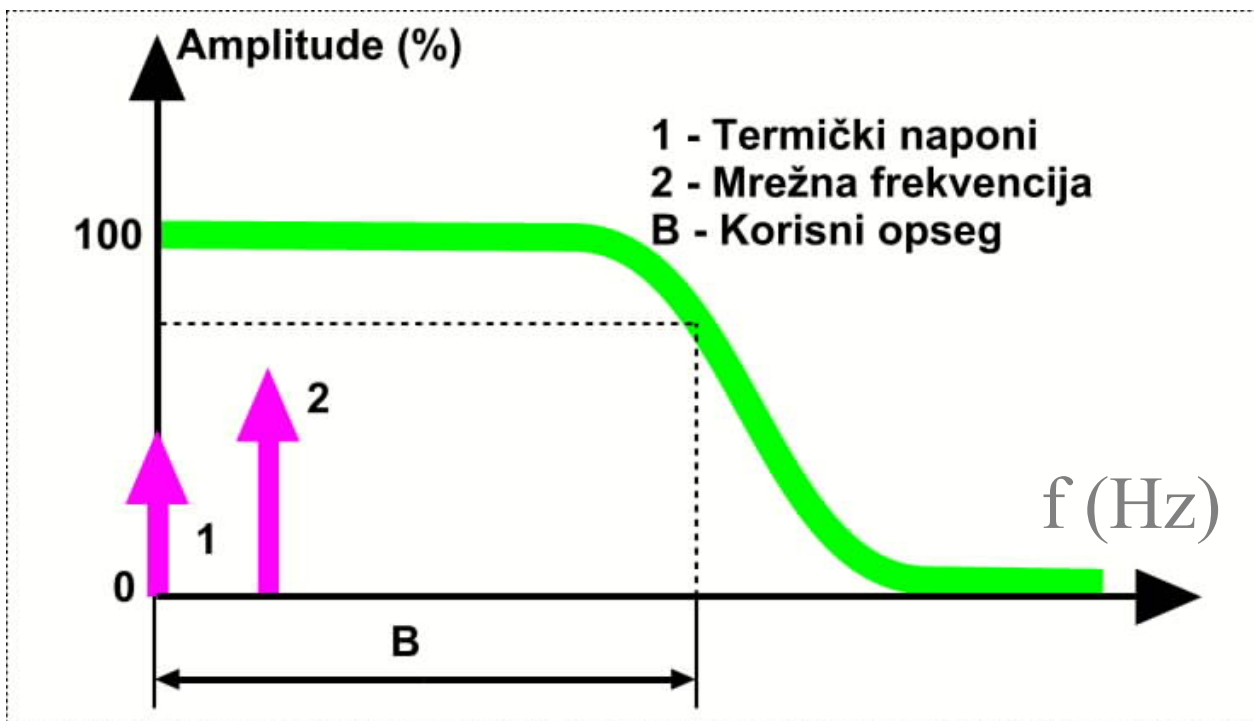
- ***Automatsko tariranje***
- ***Filtriranje***
- ***Memorisanje vršnih vrednosti***
- ***Diferenciranje, integracija ...***

NAPAJANJE mosta: DC napon



- *Uticaj temperature na “drift” nule je značajan*
- *Diferencijalno kolo za redukciju “drifta” nule*
- *Primena temperaturno osetljivih otpornika za temperaturne efekte*

Frekventna karakteristika - prenosna funkcija



Prednosti:

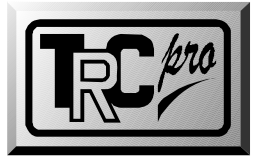
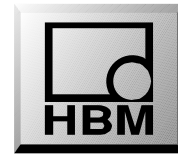
- jednostavnost
- široki frekventni opseg

Mane:

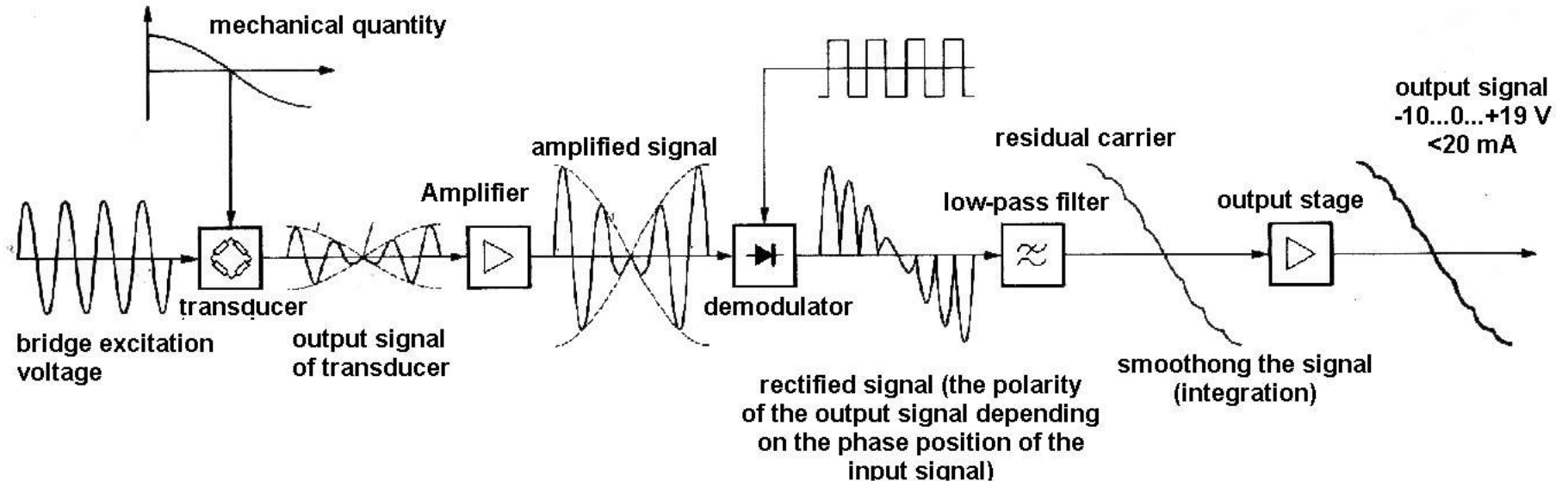
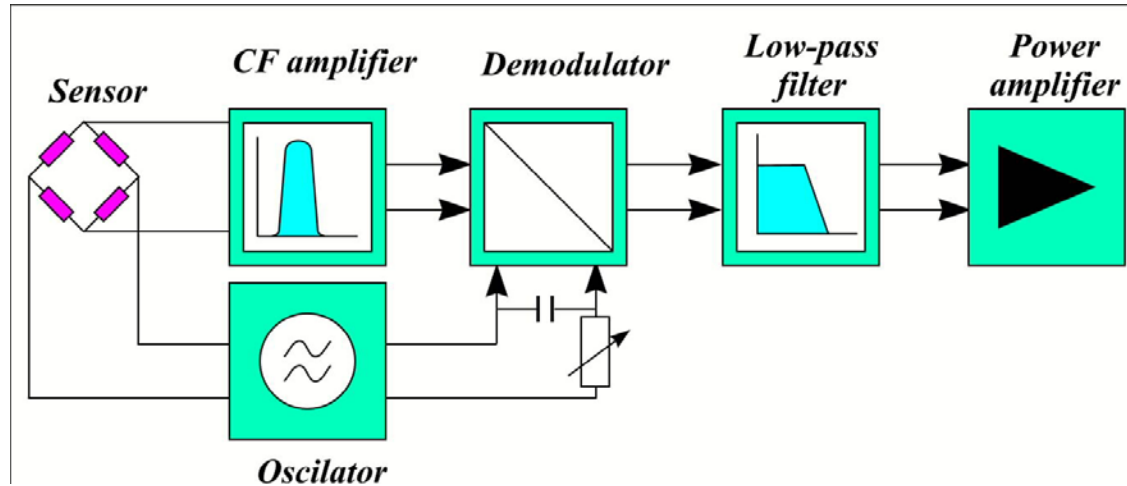
- osetljivost na smetnje
- primena ograničena na otporničke davače

Merna pojačala

AC pojačala

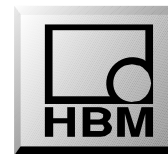


NAPAJANJE mosta: AC napon

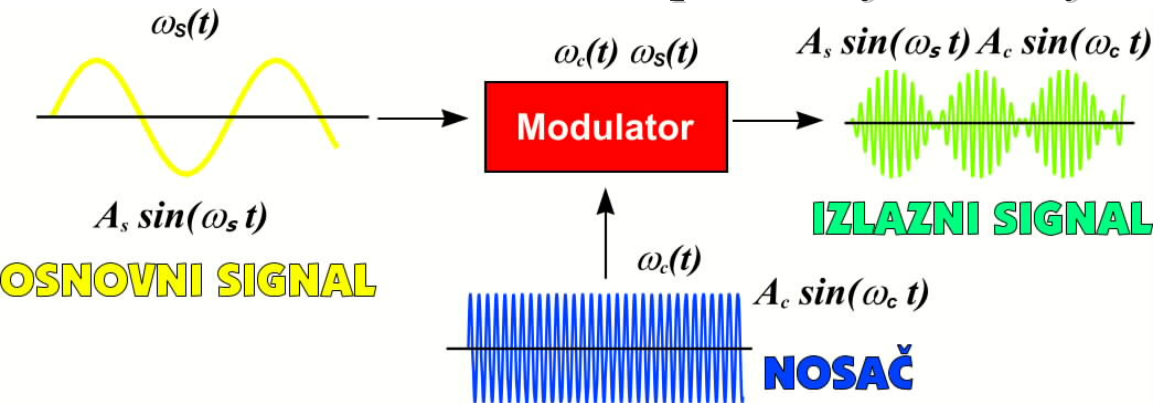


Amplitudna modulacija

Frekventni spektar

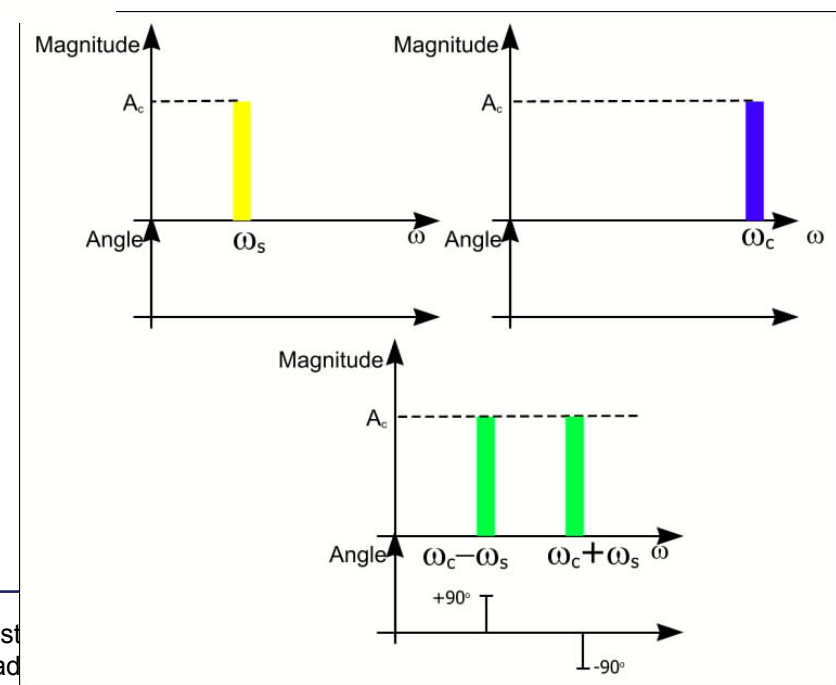


Amplitudna modulacija predstavlja množenje osnovnog signala (koji nosi informaciju) sa “nosačem”, konstantne amplitude i frekvencije.



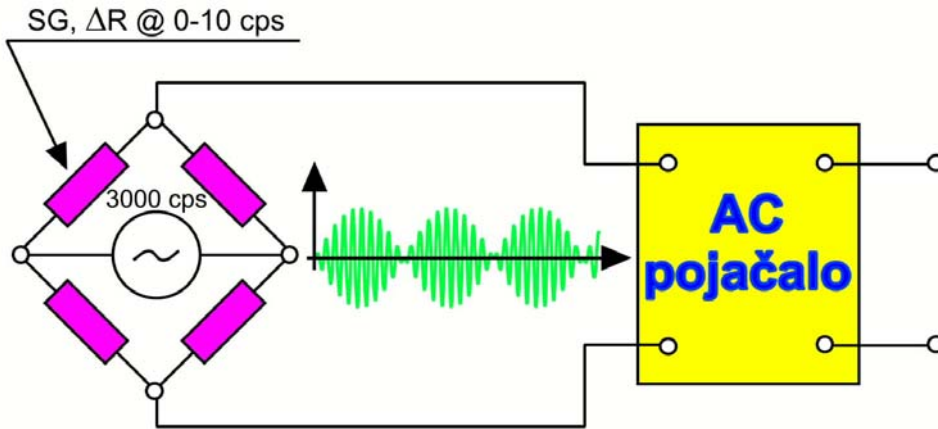
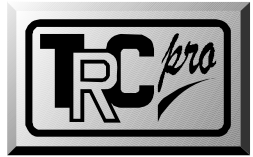
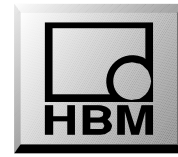
$$\begin{aligned}
 & + \frac{\gamma}{\sqrt{V_c} \cdot \sqrt{V^2}} |\sin(\omega^c - \omega^s) \cdot t - \partial 0| \\
 & = \frac{\gamma}{\sqrt{V_c} \cdot \sqrt{V^2}} |\sin(\omega^c - \omega^s) \cdot t + \partial 0| \\
 & \quad - \cos 2(\omega^c + \omega^s) \cdot t | \\
 \text{ONLBNL} & = \frac{\gamma}{\sqrt{V_c} \cdot \sqrt{V^2}} [\cos 2(\omega^c - \omega^s) \cdot t
 \end{aligned}$$

Sledi da se kao rezultat modulacije, u frekventnom spektru javljaju tzv. **BOČNE KOMPONENTE** oko centralne frekvencije: $\omega_c - \omega_s$ i $\omega_c + \omega_s$.

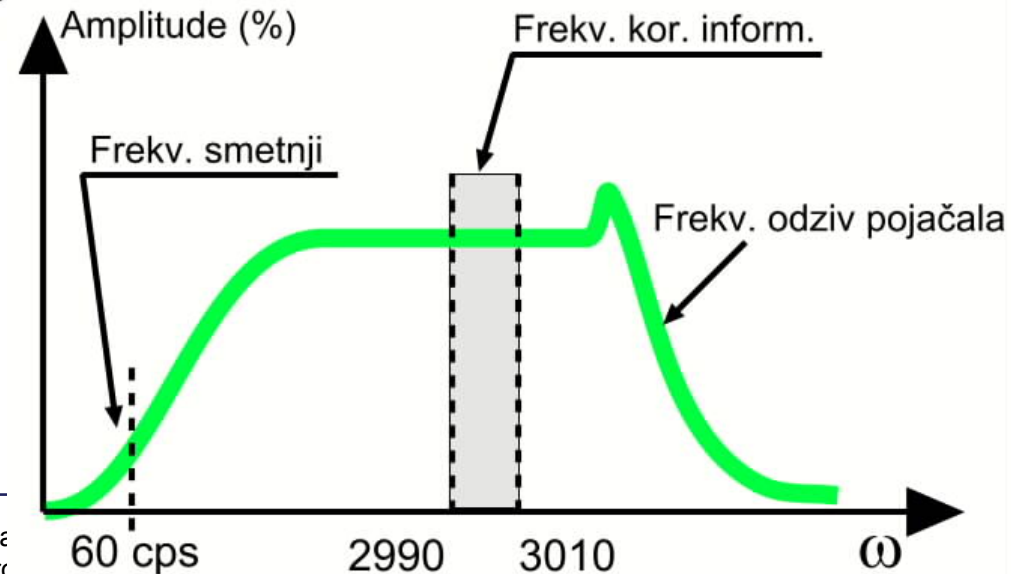
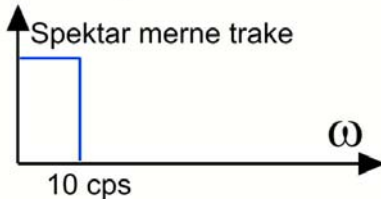


Amplitudna modulacija

Frekventni spektar



Amplitudna modulacija pomera “frekvencije koje nose korisnu informaciju” (0-10 cps) u drugi deo frekventnog opsega. Prenosna funkcija pojačala eliminira niske i visoke frekventne komponente.



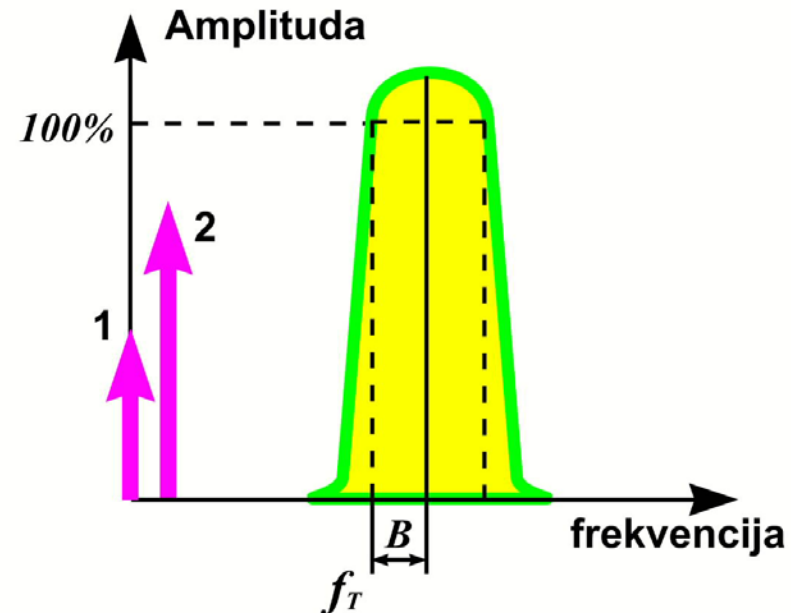
Osnovne karakteristike AC pojačala:

Prednosti:

- Odlična “neosetljivost” na visoko i nisko-frekventne smetnje
- Visoka stabilnost
- Univerzalnost u primeni (induktivni sistem)

Mane:

- Kompleksnost
- Ograničenje frekventnog opsega (ca 40% od “noseće” frekvencije)



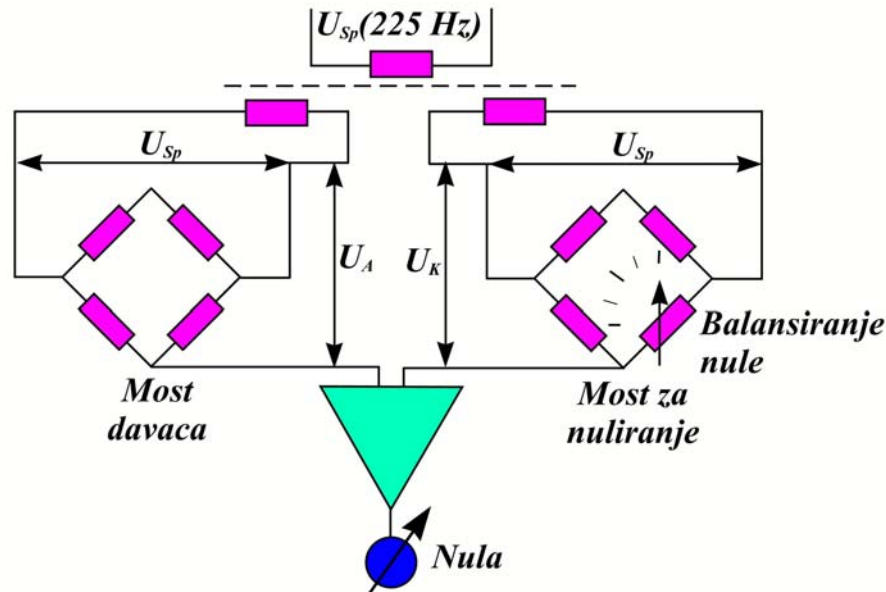
Merna pojačala

Tipovi pojačala - komparacija



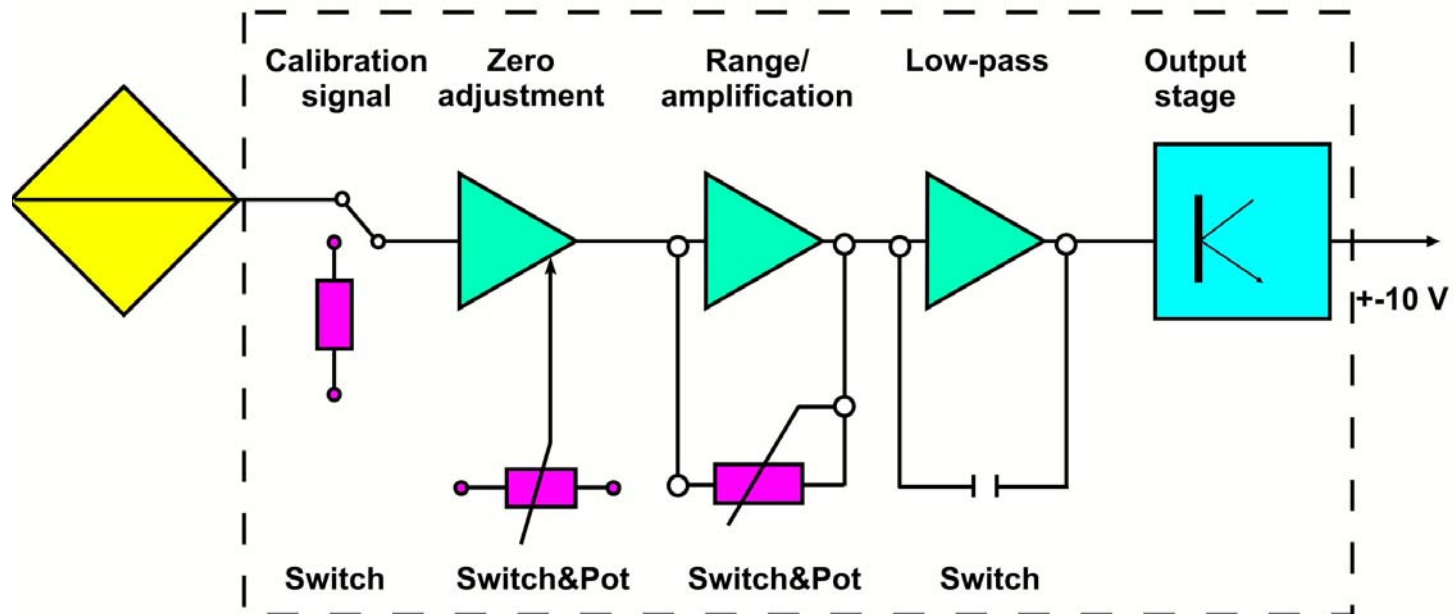
	DC	225 Hz	5 kHz	50 kHz
MERNI PRETVARAČ				
Merne trake	+	+	+	+
Induktivni davači	-	-	+	+
Pt 100	+	+	+	+
STATISTIČKI PODACI				
Stabilnost nule	osrednja	vrlo dobra	dobra	osrednja
Stabilnost pojačanja	vrlo dobra	vrlo dobra	dobra	osrednja
Linearnost	vrlo dobra	vrlo dobra	dobra	dobra
Rezolucija	osrednja	vrlo dobra	vrlo dobra	dobra
DINAMIČKI PODACI				
fg – frekventni opseg	>10 kHz	0....9 Hz	0....1000 Hz	0....10 kHz
“Stop” odziv	vrlo dobar	osrednji	vrlo dobar
UTICAJ SMETNJI				
Termo – naponi	da	ne	ne	ne
Pobuda od 50 Hz	da	ne	ne	ne
Nisko – frekventne smetnje	da	niska	ne	ne
TAČNOST	0.2 do 0.05	0.2 do 0.0005	0.2 do 0.1	0.25

Šema kompenzatorskog kola



- Promena pojačanja signala, linearnost pojačala i napajanje mernog pretvarača nemaju uticaja na izmerenu vrednost.
- Visoka tačnost pri statičkim i "kvazistatičkim" merenjima.
- Primena u kalibracione svrhe (DK38, tačnost 0.0025%).
- Instrumenti za nuliranje nemaju naponski (V) ili strujni (A) izlaz.
- Balansiranje se vrši ručno ili automatski.

Konvencionalna struktura analognog pojačala

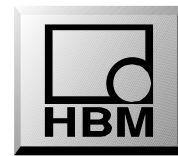


Osnovne karakteristike:

- **Nepostojanje kontrole od strane računara**
- **Jedino je moguće ručno upravljati**

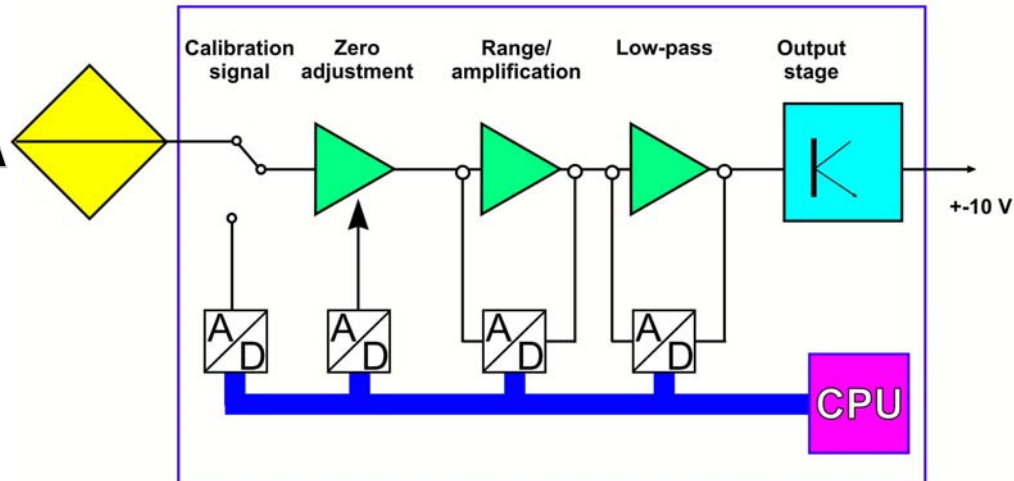
Merna pojačala

Računarsom kontrolisana pojačala



Osnovne karakteristike:

- Komplikovana struktura
- Potrebna visoka rezolucija D/A konvertora



Ilustracija potrebne D/A rezolucije

Merni opseg: $\pm 0.1 \text{ mV/V} \dots \pm 2.5 \text{ mV/V}$

Display: 10.000 digita

Balans nule: 100% od max. mernog opsega

Inkrement D/A konvertera:

1 digit prikazane vrednosti za najmanji merni

opseg: $0.1 \text{ mV/V} / 10.000 \text{ d} = 10 \text{ nV/V}$

Maksimalni merni opseg:

$\pm 2.5 \text{ mV/V} = 5 \text{ mV/V}$ (opseg)

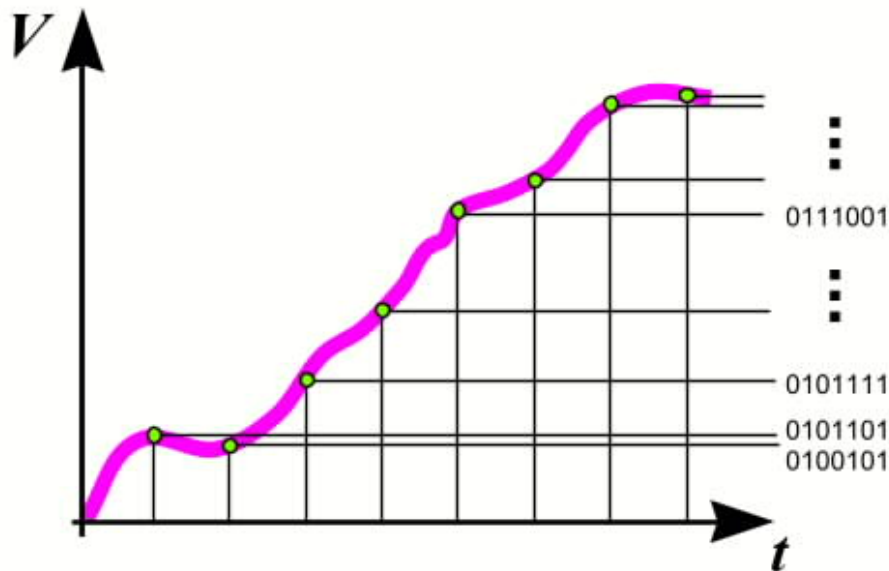
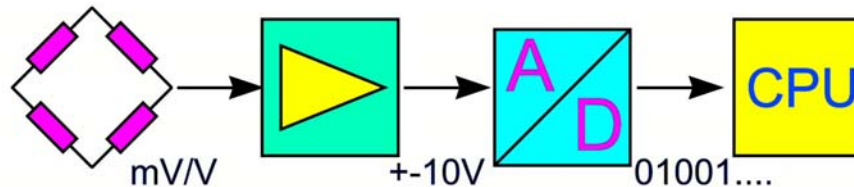
Potrebna D/A rezolucija

$5 \text{ mV/V} / 10 \text{ nV/V}$

500.000 inkremenata

(ca 19 bita!)

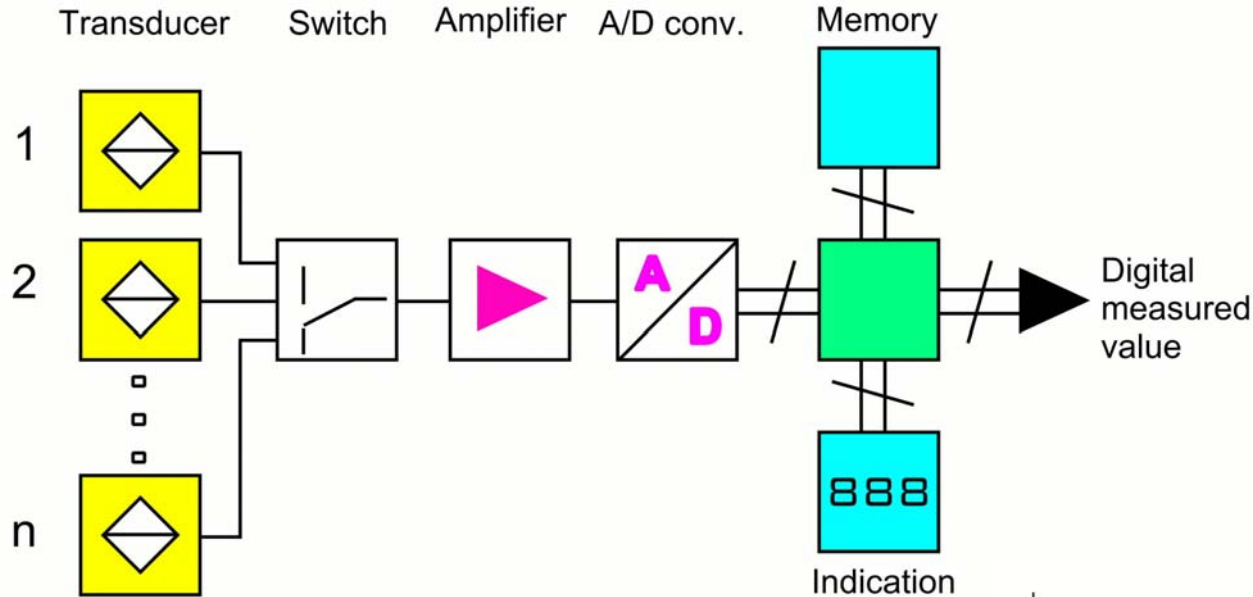
Jednostavna struktura digitalnog pojačala



Osnovne karakteristike

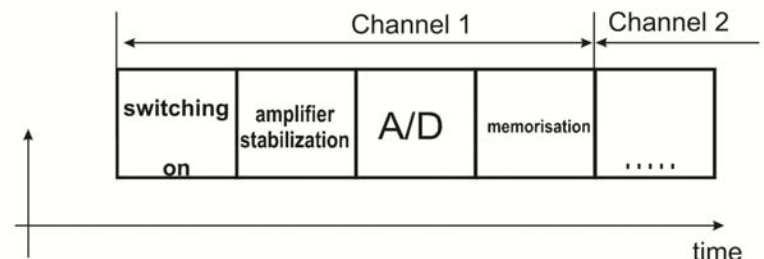
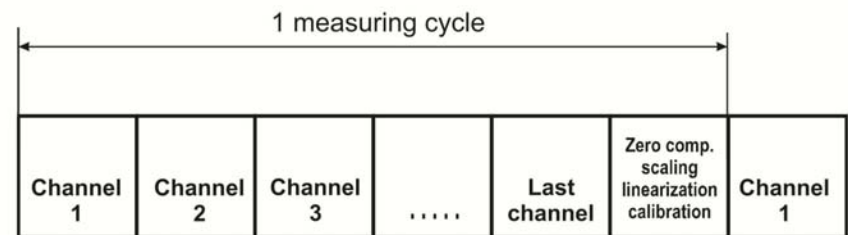
- Umesto signala proporcionalnog naponu, proces je prikazan diskretnim - digitalizovanim vrednostima, što rezultira u gubitku dela informacija.
- Numeričke vrednosti imaju konačnu rezoluciju, koja zavisi od broja bitova.
- Za prenos, memorisanje, procesiranje numeričkih vrednosti potreban je računar određeniog kapaciteta - performansi.

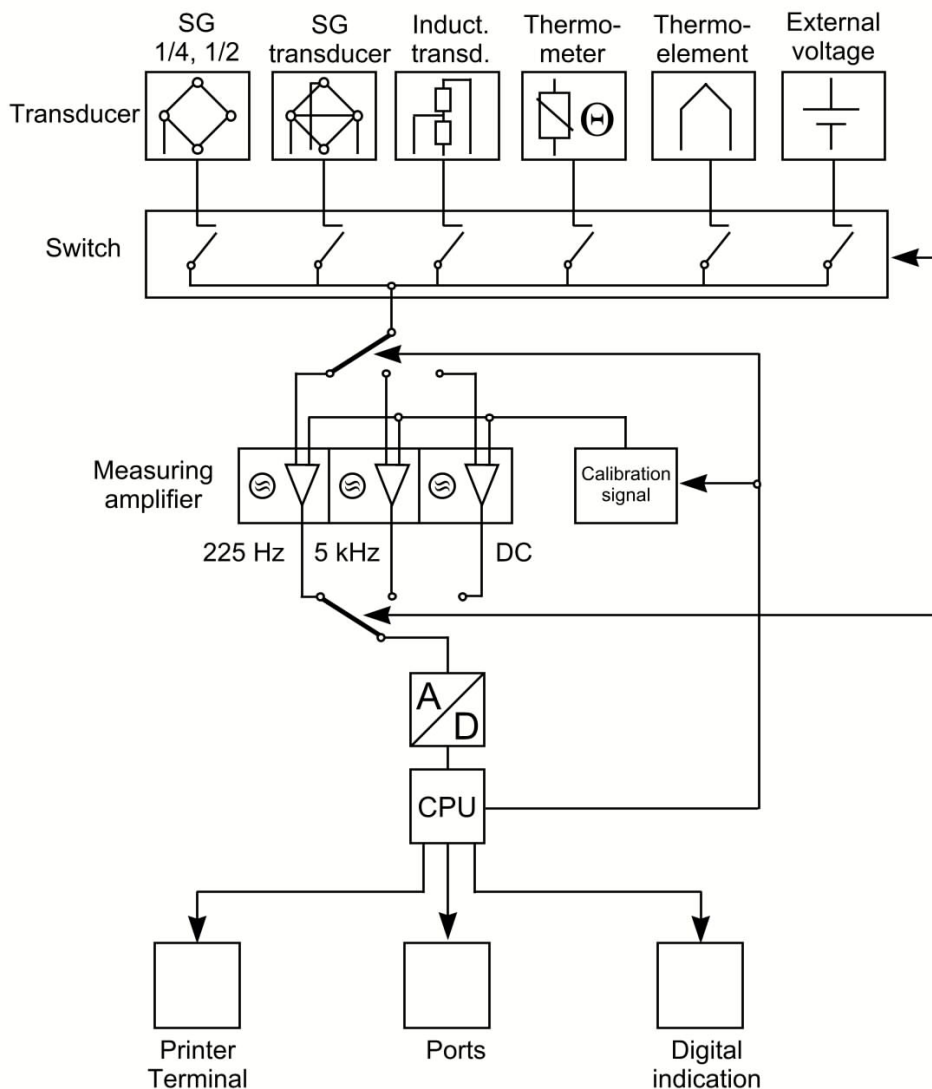
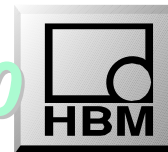
Klasična struktura akvizicijskog sistema



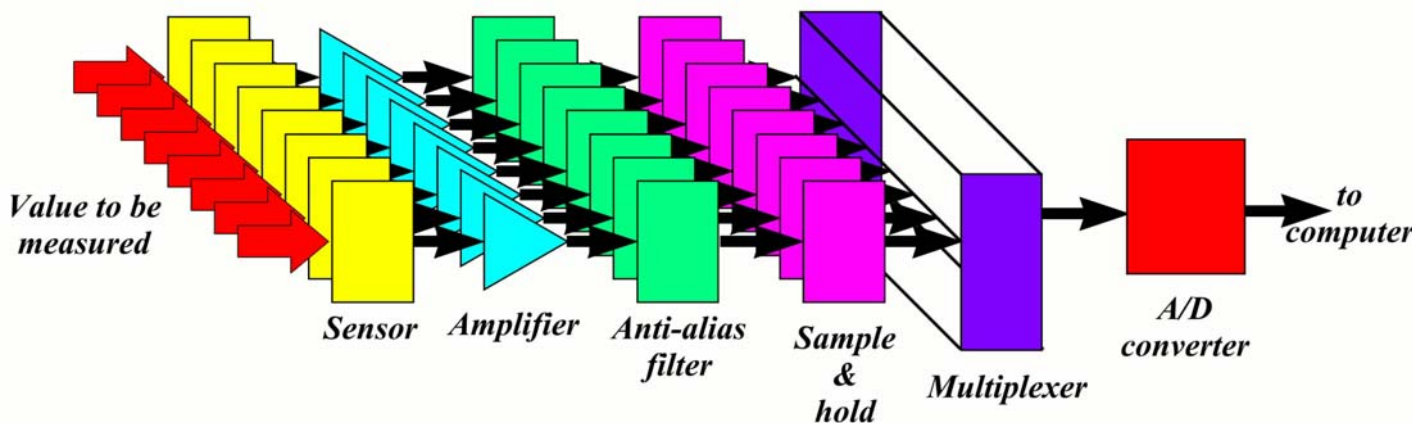
Osnovne karakteristike

- primena za statičke i kvazistatičke procese na većem broju mernih mesta
- brzina merenja zavisna od broja aktivnih mernih kanala
- jeftino rešenje



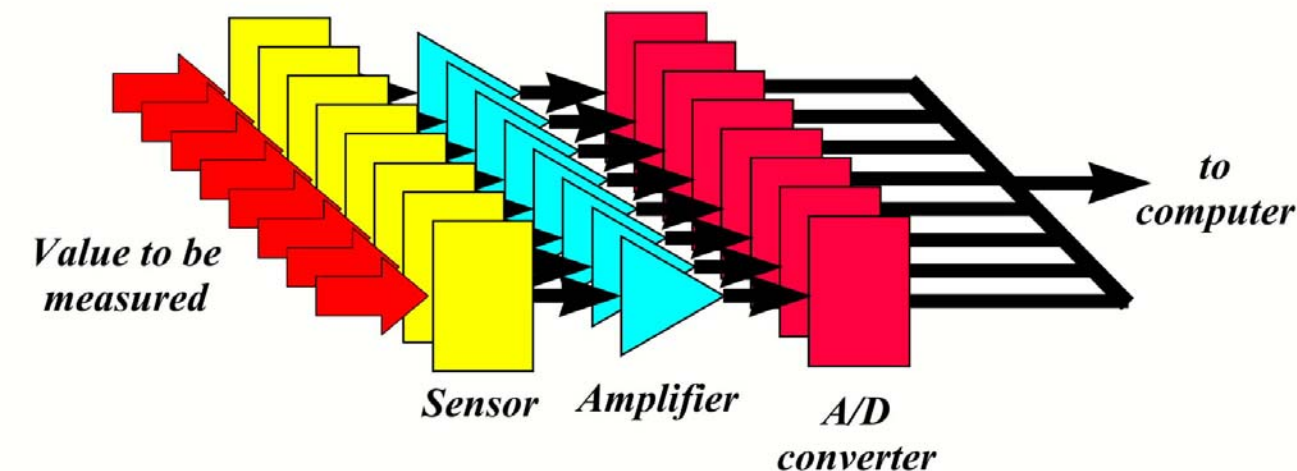


a) Struktura "MULTIPLEX" sistema

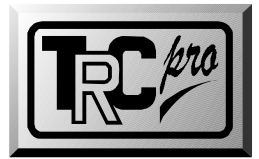
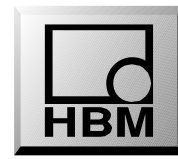


- Potrebni anti-aliasing filtri
- Visoka cena po kanalu

b) Struktura "PARALELNOG" sistema



- Nema potrebe za anti-aliasing filtrima
- Sve prednosti A/C pojačala



Pitanje rezolucije:

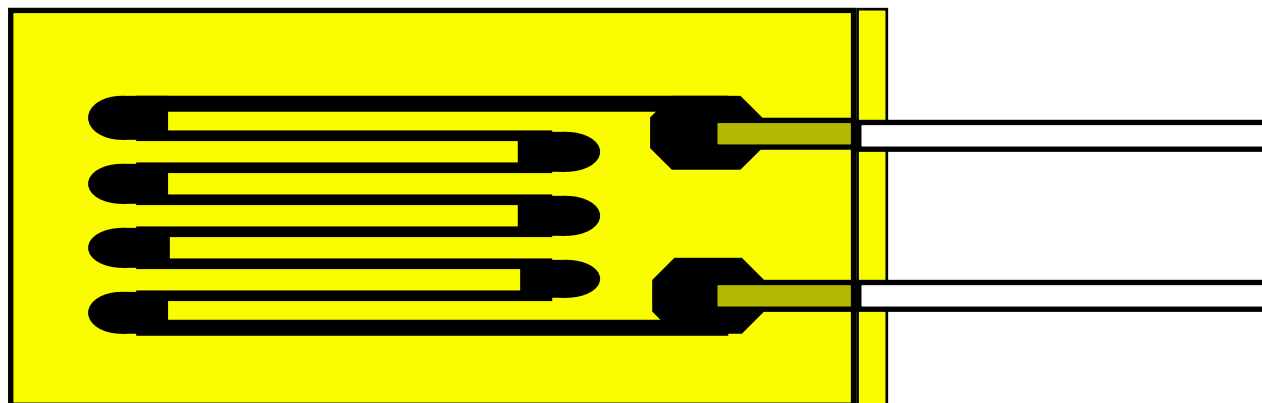
VISOKA REZOLUCIJA!

2.000.000 KORAKA

za 2 mV/V

Merna pojačala

Visoka rezolucija: ZAŠTO?



Merno vlakno:

$$x_0 = 3 \text{ mm}$$

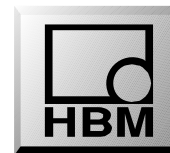
Izduženje pri nom. opterećenju:

$$\Delta x = 3 \mu\text{m}$$

Parc. izduženje od 1/2.000.000:

$$\Delta \Delta x = 0.0015 \text{ nm}$$

Adequatno 1% prečnika of atoma Heliuma



Koliko je $\frac{1}{2.000.000}$?

- 50 μm trke na 100 m
- < 5 cm puta: Ljubljana - Darmstadt
- 0.009 s ove prezentacije
- 0.5 g od 1000 kg

Merna pojačala

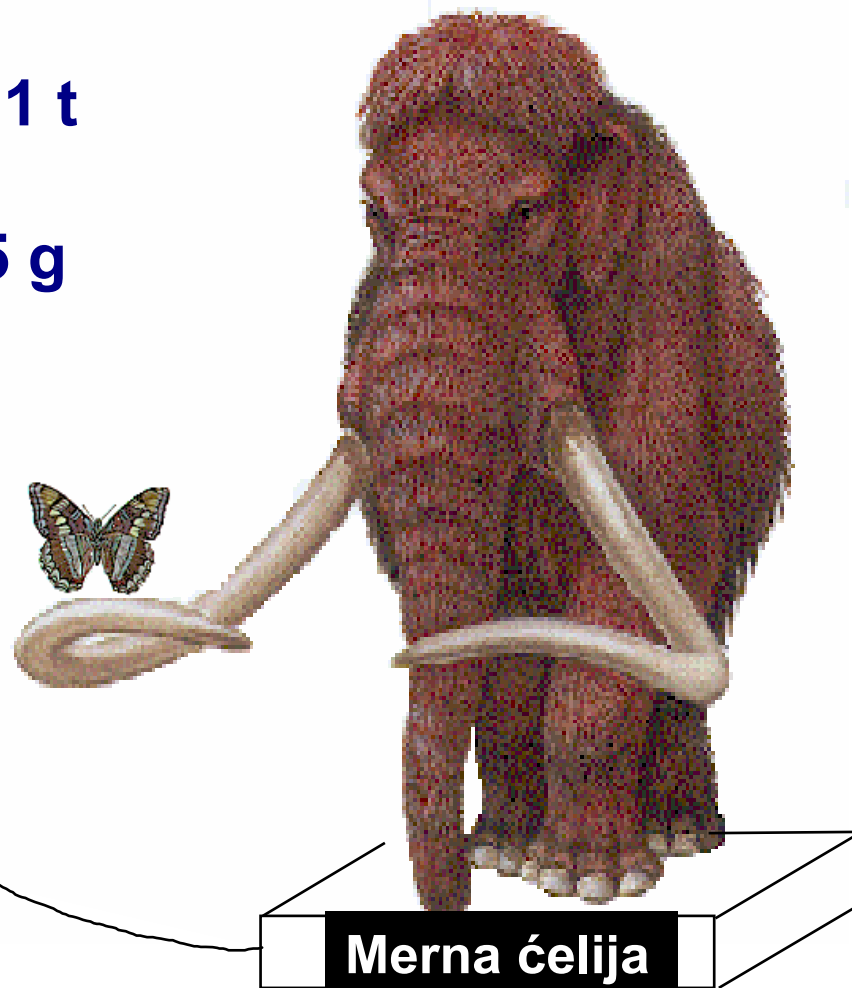
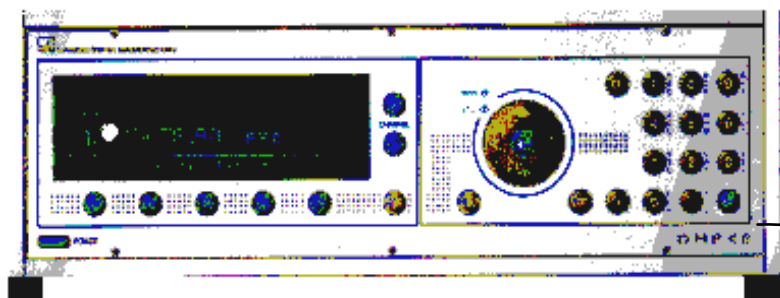
Visoka rezolucija



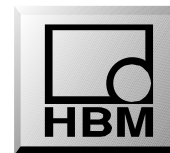
Mamut = 1 t

Leptir = 5 g

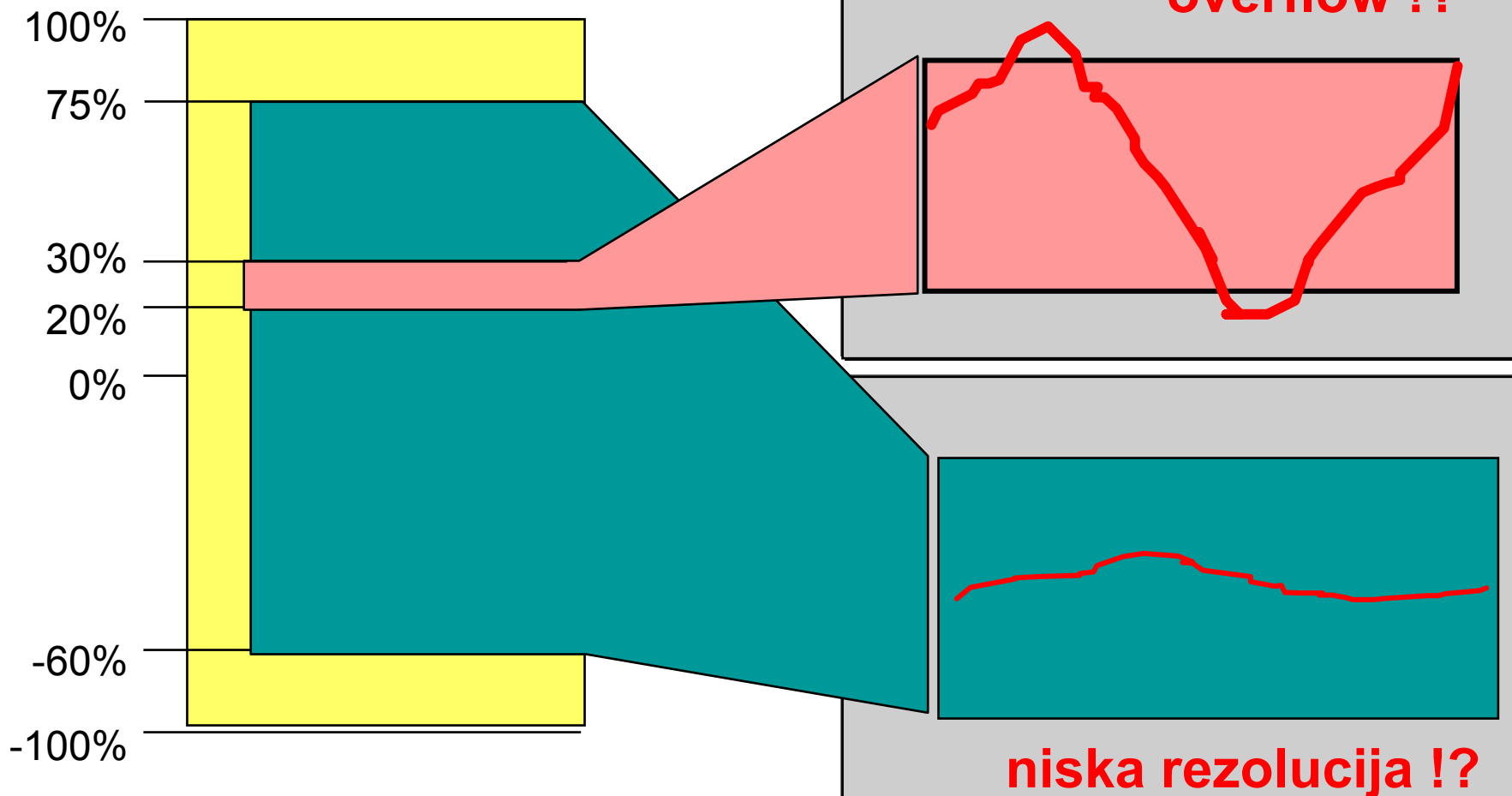
DMP 40



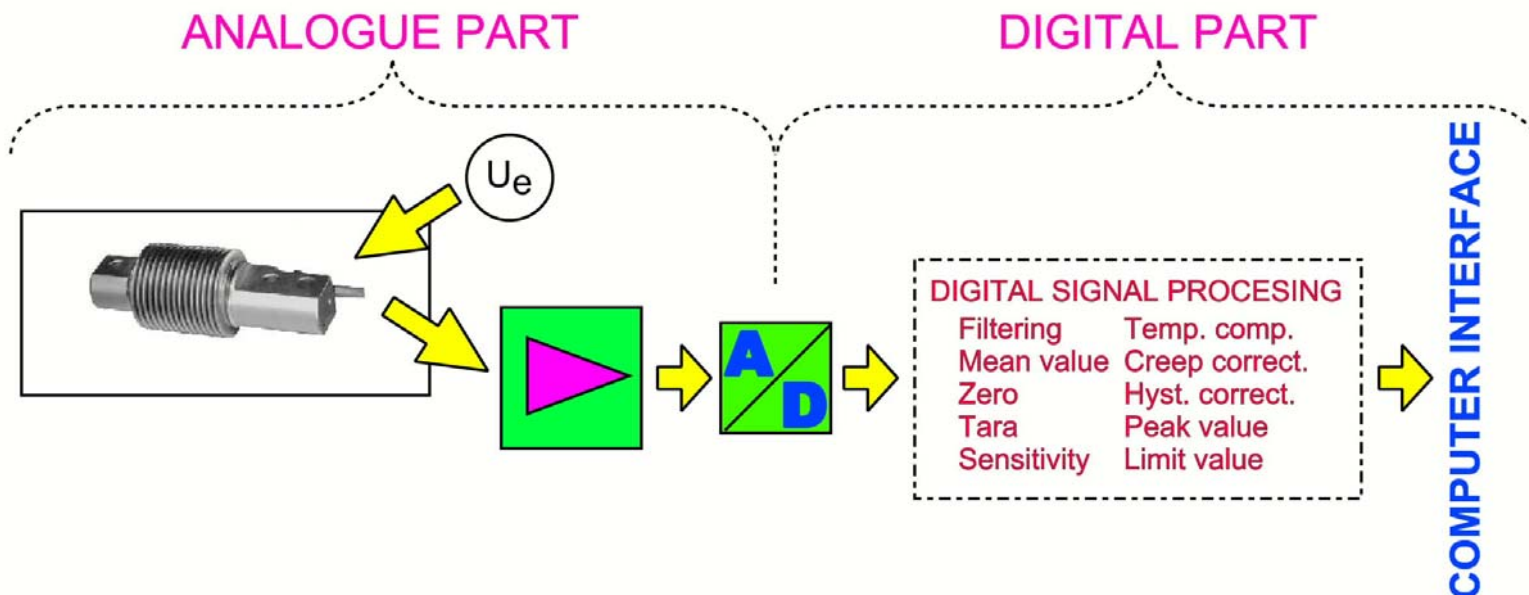
Merna ćelija



Merni opseg davača



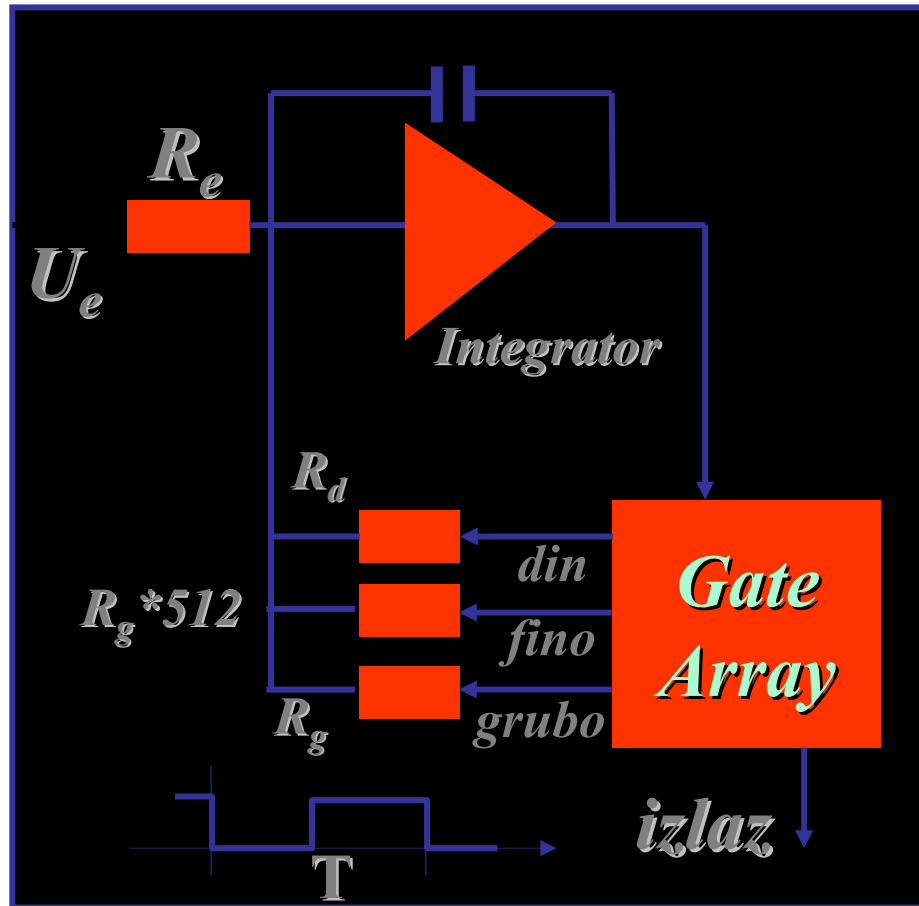
Sa 20 - bitnom rezolucijom uvek možemo koristiti pun opseg!!



Osnovne karakteristike

- Malo pojačanje, nema potrebe za podešavanjem mernog područja
- Nisko-pojasno filtriranje (nema potrebe za anti-aliasing filtrima)
- Digitalno procesiranje podataka: TOTALNA KONTROLA!!
- Kontrola primenom računara

MPDM princip od HBM (Multi-Pulse- Dauermodulation)



- Nema gubitka informacija
- Integracioni postupak
- Prigušenje visokih frekvencija
- Rezolucija do max. 24 bita
- Frekvencija konverzije 38400 Hz
- GATE ARAY tehnologija



Gornja granica za rezoluciju je određena termičkim šumom otpornika (V) (tenzometrijskog pretvarača).

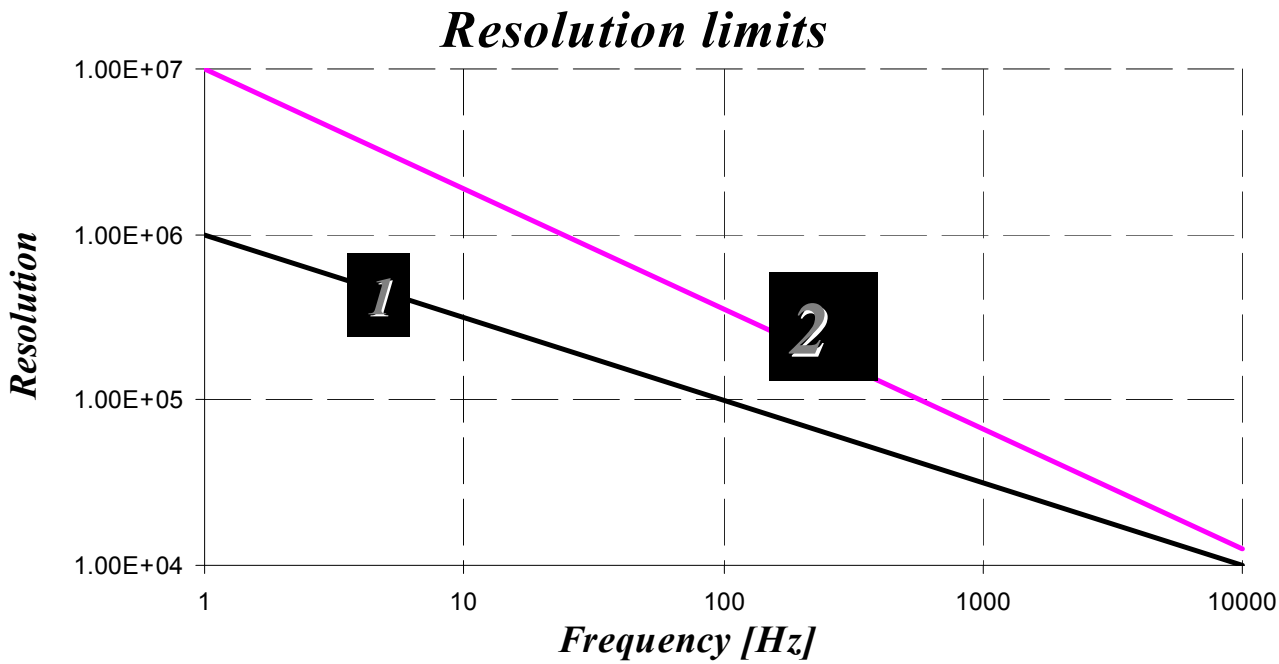
$$V = 8\sqrt{kTRB}$$

- k - Boltzmanova konstanta ($1.28 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$)
- R - Elektr. otpor davača 350Ω
- T - Apsolutna temperatura 293 K
- B - Frekventni opseg u Hz

Sa osetljivosti davača $S=2 \text{ mV/v}$ i napajanjem $U=5 \text{ V}$

$$U_n = 10\sqrt{B} \text{ nV}$$

$$U_{\text{sig}} = US = 10 \text{ mV}$$

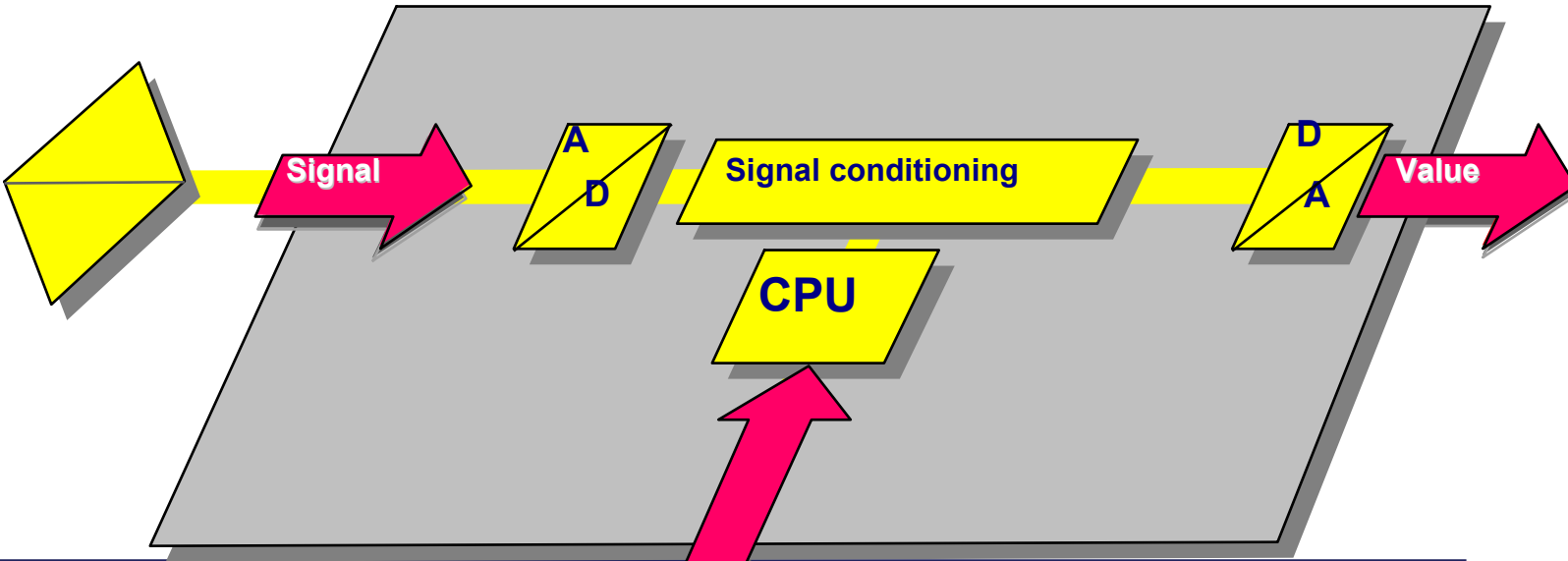
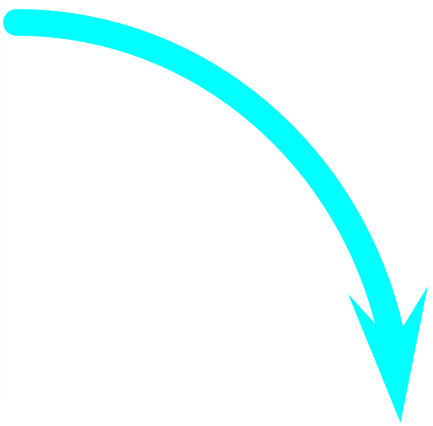
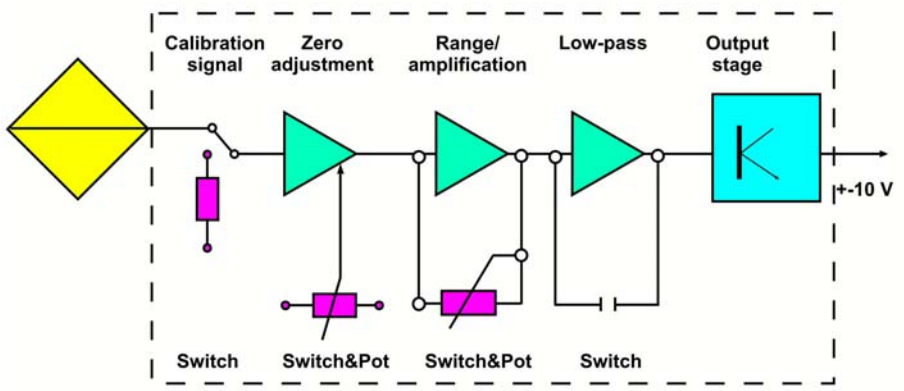


1 - S/N kriva davača

3 - HBM, A/D konverter

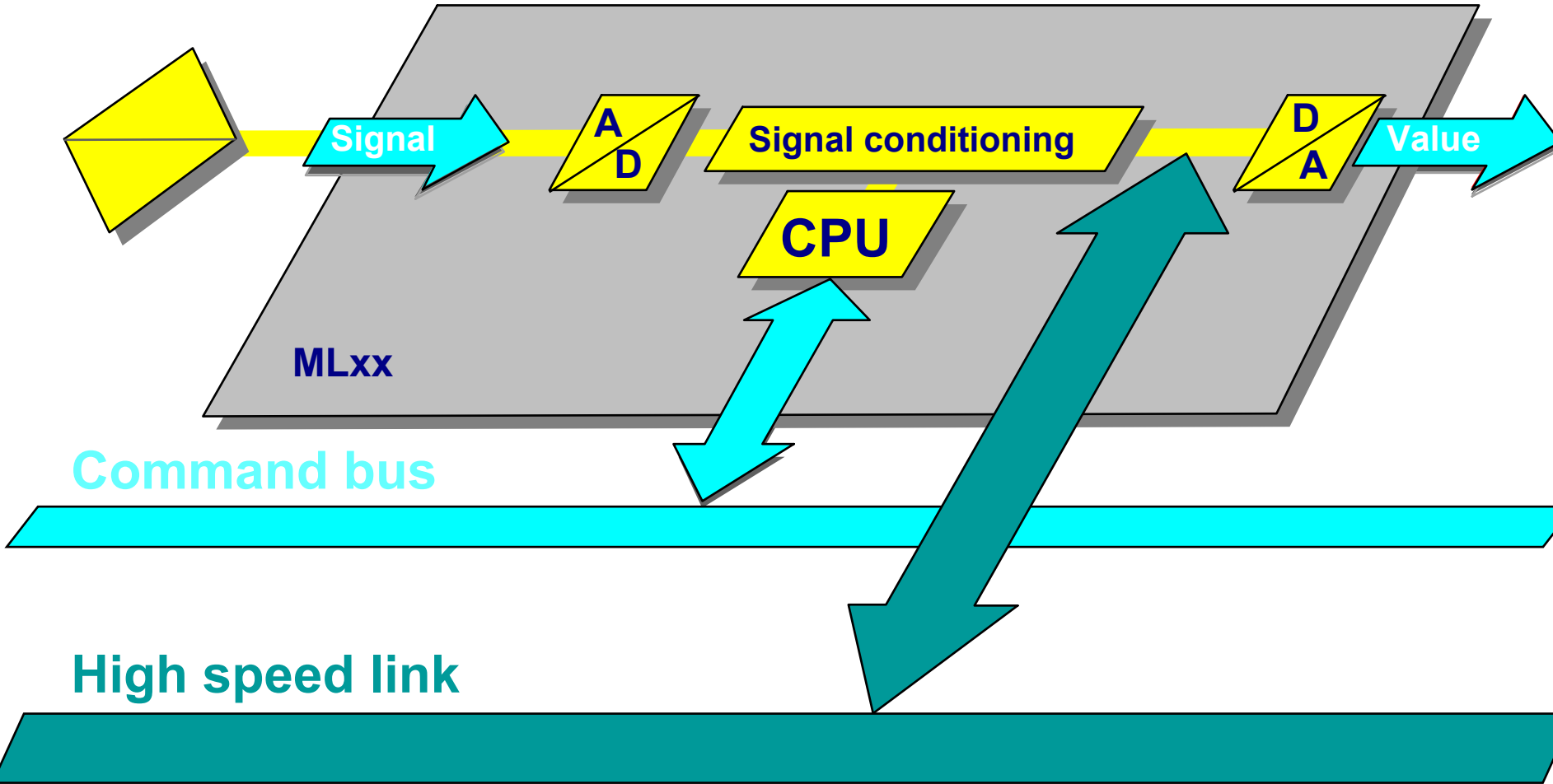
Merna pojačala

Nova tehnika i tehnologija



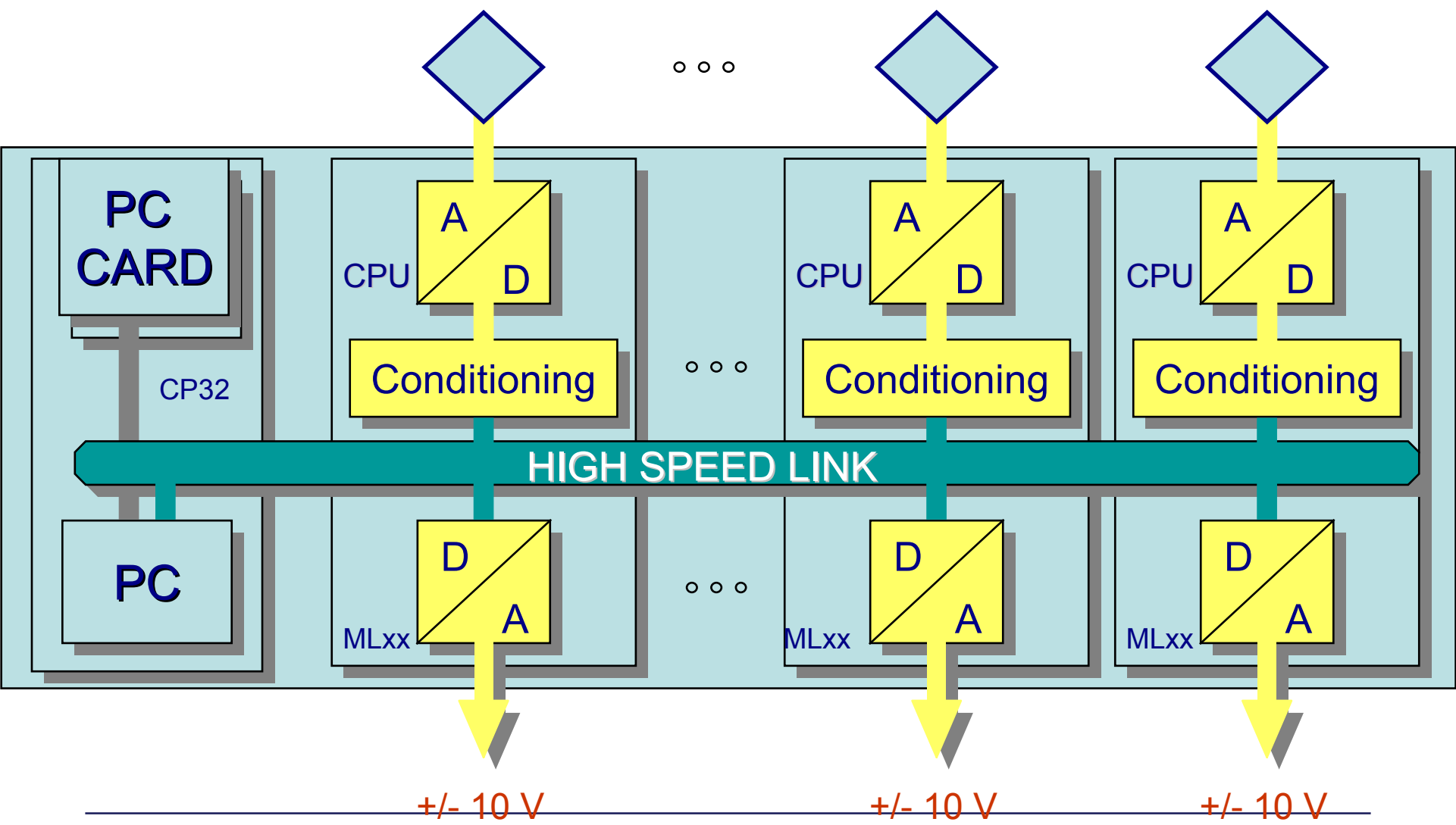
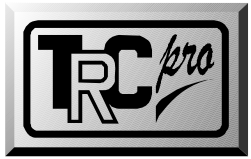
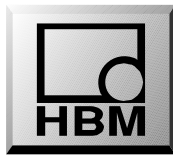
Merna pojačala

Struktura sistema MGCplus



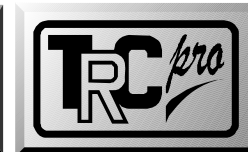
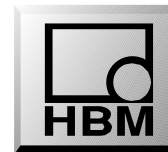
Merna pojačala

Struktura MGCplus sistema



Merna pojačala

MGCplus: Visoka perfekcija



MGC - plus:

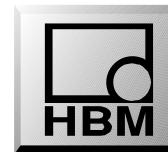
- *Modularna arhitektura (pojačivački moduli 2-16 kanala, zavisno od tipa kućišta, AC ili DC napajanje mosta)*
- *Dva +/- 19V za svaki kanal*
- *9600 Hz očitavanje po kanalu, 20-bit rezolucija*
- *RS232C, RS485, IEEE 488*
- *Ugradjen PC može pohraniti 700.000 uzoraka u poseban buffer*



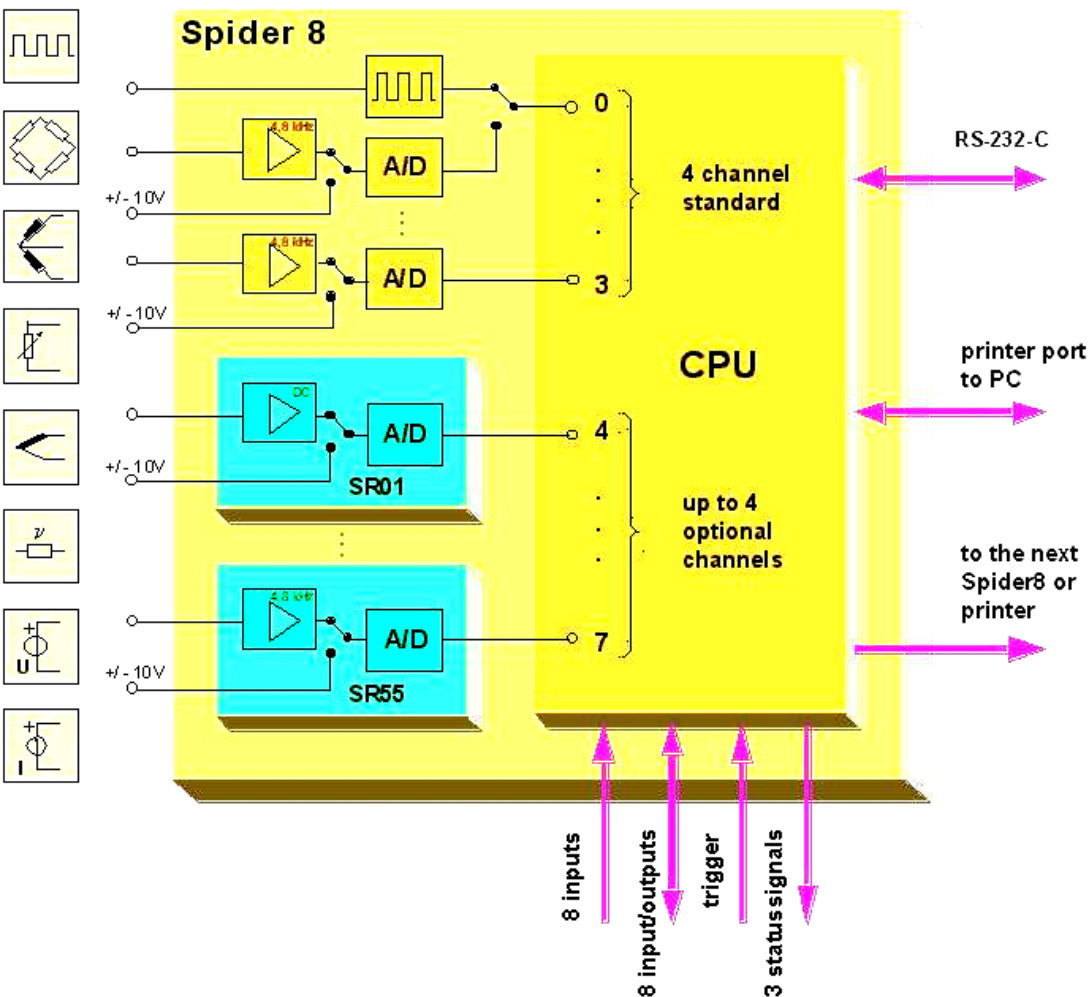
Svi poznati senzori se mogu priključiti na sistem !

Merna pojačala

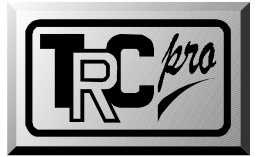
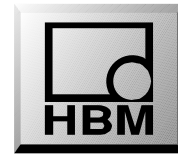
Sistem SPIDER: LOW-COST rešenje



SPIDER 8:



- *9600 Hz sampling rate p.c.,*
- *16-bit rezolucija*



WORKSHOP

ANALIZA GREŠKE

➤ **GRUBE GREŠKE:**

- Nekorektno popvezivanje mernih traka,
- Nekorektno rukovanje mernim uređajem
- Nesagledavanje svih uticaja
- Greške u očitavanju

POMOĆ!? Nema pomoći: ili uočavanje ili neupotrebljivi rezultati

➤ **SISTEMATSKE GREŠKE**

- Netačnost mernog sistema
- Sistematski uticaji okoline

POMOĆ!? Kalibracija mernog sistema; Rekalibracija

➤ ***SLUČAJNE GREŠKE:***

- Slučajni uticaji,
- Nepouzdanost merne opreme, nestabilnost
- Slučajni uticaju u mernom procesu
- Uticaj čoveka

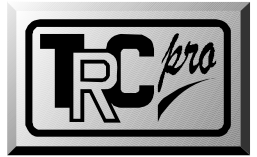
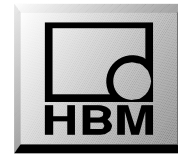
POMOĆ!? Povavljanje merenja (eksperimenta), statistika

➤ ***DINAMIČKE GREŠKE***

- Inertnost mernog sistema u odnosu na proces
- Amplitudne i fazne greške

POMOĆ!? Analizirati prenosnu funkciju sistema, uskladiti

Analiza greška



Moguća sistematska greška

a1) Greška mernog pretvarača

➤ Tolerancija k faktora merne trake $f_1=1\%$

a2) Greška mernog pojačala (primer) $f_2=0.05\%$

a3) Greška indikacije

➤ Greška digitalne indikacije $f_3=\pm 1 \text{ digit} = 0.17\%$

a4) Greška od opterećenja

➤ Greška u masi tegova $f_4=0.1\%$

➤ Greška u napadnoj tački opterećenja
(150 mm sile i ose merne trake) $\pm 0.5 \text{ mm}$ $f_5=0.33\%$

a5) Greška električnog povizivanja, kablovi.... $f_6=0.1\%$

Verovatna sistematska greška merenja

$$f_e = \pm \text{sqrt}(\sum f_i^2) = \pm \text{sqrt}(f_1^2 + f_2^2 + f_3^2 + \dots + f_n^2) = \pm 1.02\%$$



b) Greška koja potiče od uzorka

➤ Greška u širini $b = \pm 0.6 \text{ mm}$ od 20 mm $f_7=3\%$

➤ Greška u debljini $h = \pm 0.5 \text{ mm}$ od 2 mm $f_8=2.5\%$

Greška u debljini je kvadrirana jer debljina u izrazima za proračun napona savijanja učestvuje sa kvadratom ($W = bh^2/6$).

$$f_{uzorka} = \pm \sqrt{3^2 + 2 \cdot 2.5^2} = \pm 4.46 \%$$

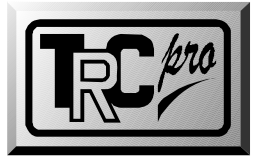
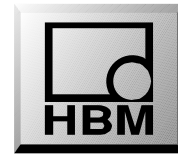
c) Greška koja potiče od materijala (Kod određivanja napona!!)

Vrednosti modula elastičnosti za različite materijale koji se vade iz tablica predstavljaju srednje vrednosti niza izmerenih modula elastičnosti.

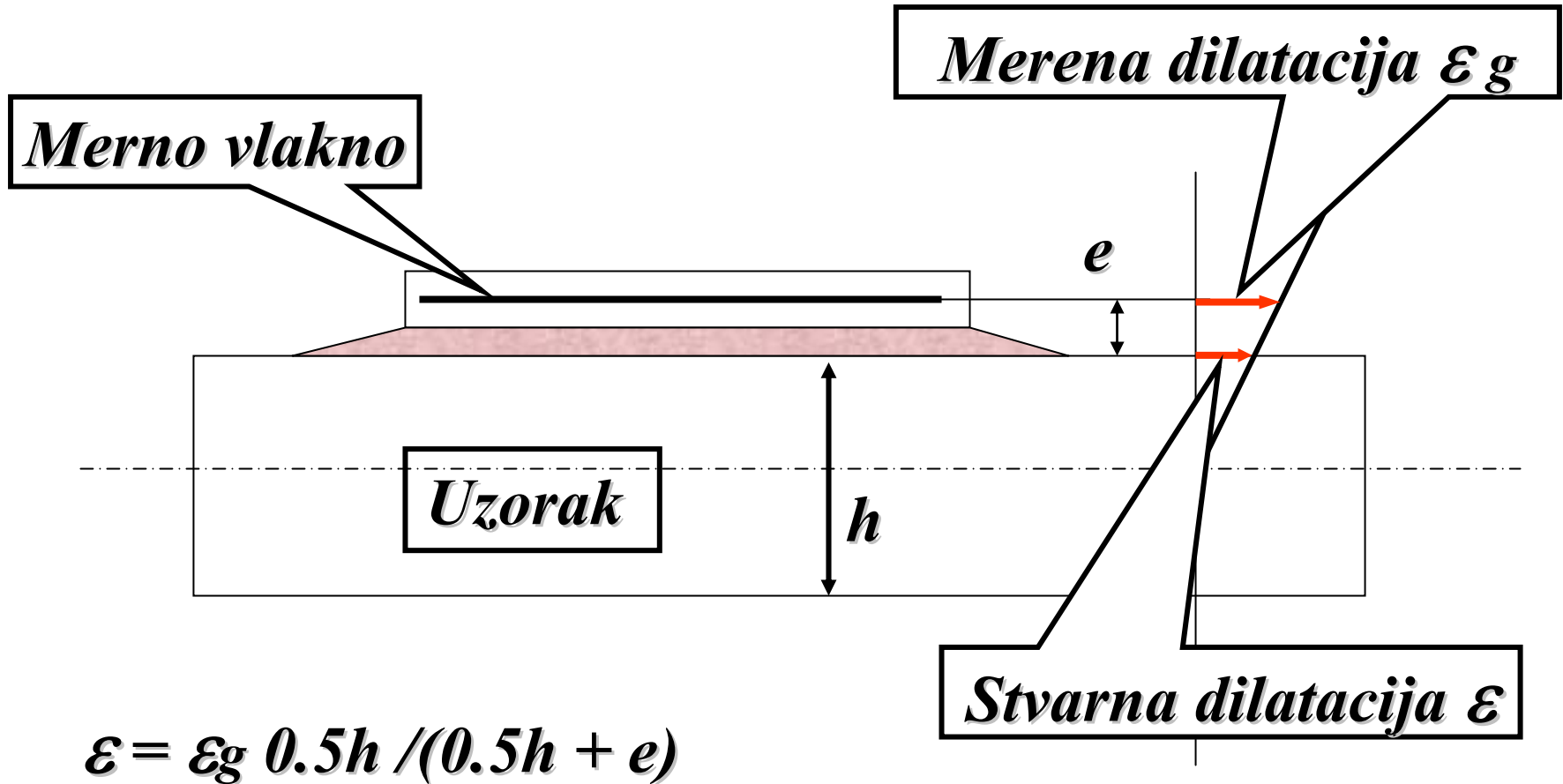
➤ Greška od modula elastičnosti $f_E=3\%$

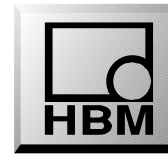
Analiza greške

Sistematska greška



➤ *Korekcija sistematske greške:*





- *Greške mernog pretvarača,*
- *Greške mernog pojačala*
- *Greške instrumenta (procena 1/10 podeoka)*

Kao i:

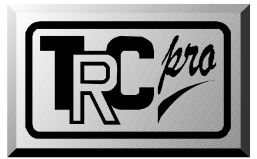
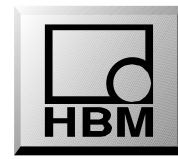
- *greške koje potiču od opterećenja*
- *greške koje potiču od električnog kola (otpor kablova)*

Ukupna sistematska greška se računa kao geometrijska suma individualnih sistematskih grešaka:

$$f = \pm \sqrt{\sum f_i^2} = \pm \sqrt{f_1^2 + f_2^2 + f_3^2 + \dots + f_n^2}$$

Analiza greške

Slučajna greška



➤ ANALIZIRAMO:

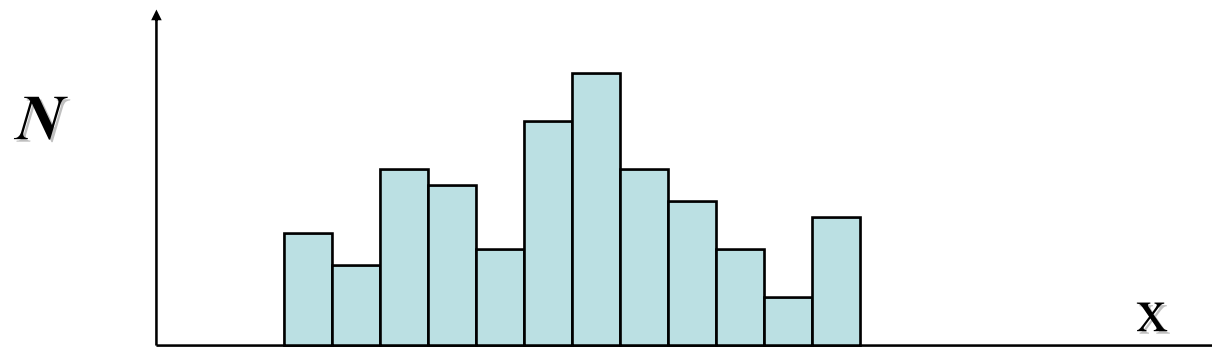
➤ *Klasu tačnosti (K)*

➤ *Izmerenu vrednost dilatacije pri nominalnom opterećenju: ϵ_{nom}*

➤ STATISTIČKA ANALIZA izmerenih vrednosti

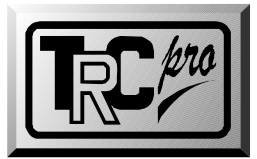
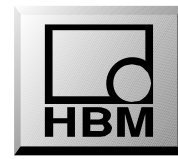
Izmerene vrednosti podležu Gaus-ovoj raspodeli pod uslovom da su odstupanja vrednosti čisto slučajnog karaktera!

Na bazi datog broja uzoraka možemo formirati histogrtam.

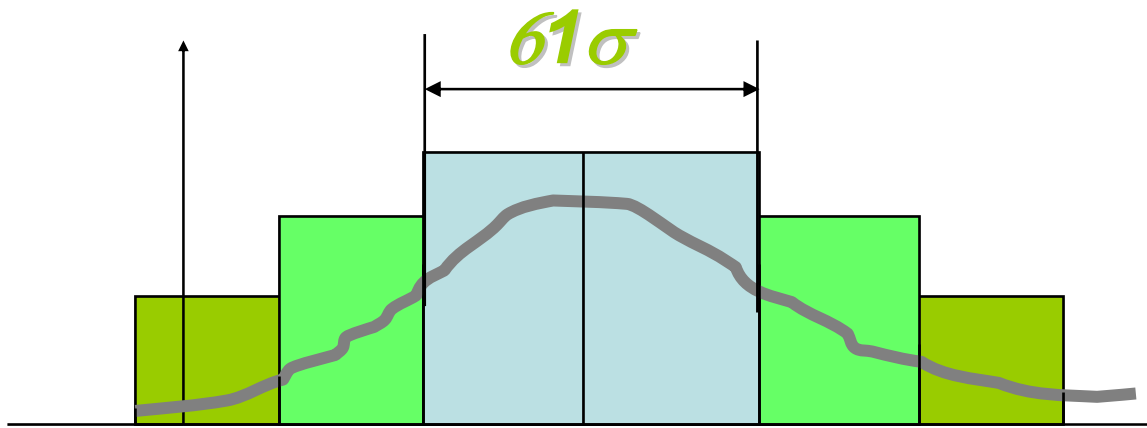


Analiza greške

Slučajna greška



- U idealnim uslovima, kada $N \geq 30$, dobija se Gaus-ova distribucija. Tu važi:



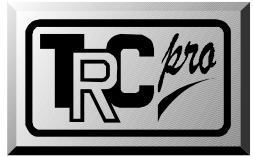
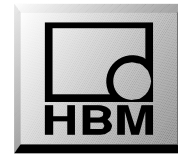
63,8% vrednosti leži u nutar 61σ

95,4% vrednosti leži unutar 62σ

99,7% vrednosti leži unutar 63σ

Analiza grešaka

Standardna devijacija



Standardna devijacija je najznačajniji faktor za sračunavanje devijacije individualnih, izmerenih veličina od njihove srednje vrednosti.

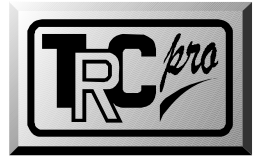
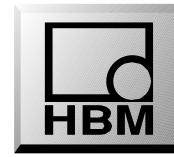
$$s = \sqrt{\frac{\sum(\varepsilon_i - \varepsilon_{sr})^2}{(n-1)}}$$

- $\varepsilon_{sr} \pm 1\sigma \Rightarrow P=68.3\%$
- $\varepsilon_{sr} \pm 2\sigma \Rightarrow P=95.4\%$
- $\varepsilon_{sr} \pm 3\sigma \Rightarrow P=99.7\%$
- $\varepsilon_{sr} \pm 1.96\sigma \Rightarrow P=95\%$
- $\varepsilon_{sr} \pm 2.58\sigma \Rightarrow P=99\%$

TO ZNAČI (primer):

**95.4% svih izmerenih
veličina leže unutar područja**

$$\varepsilon_{sr} \pm 2\sigma$$



- Kao rezultat merenja se često uzima srednja vrednost serije rezultata ε_{sr} , što nije pravilno osim ako je broj uzoraka beskonačno velik!
- U realnim uslovima govorimo o **STATISTIČKIM PROCENAMA** za određene parametre (sr. vrednost, stand. odstupanje, klasu tačnosti... itd.), koje zavise od broja uzoraka
- Za te PROCENE je moguće je odrediti dve granice: gornju i donju, koje definišu tzv. **INTERVAL POVERENJA** u kojem će ležati stvarna veličina sa sa nekom verovatnoćom P .

Granice poverenja se računaju iz **STUDENTOVE** raspodele, sa oznakom t , i standardne devijacije s :

$$\varepsilon_{sr} - t \cdot s / \sqrt{n}$$

Donja granica
poverenja

$$\pm t \cdot s / \sqrt{n}$$

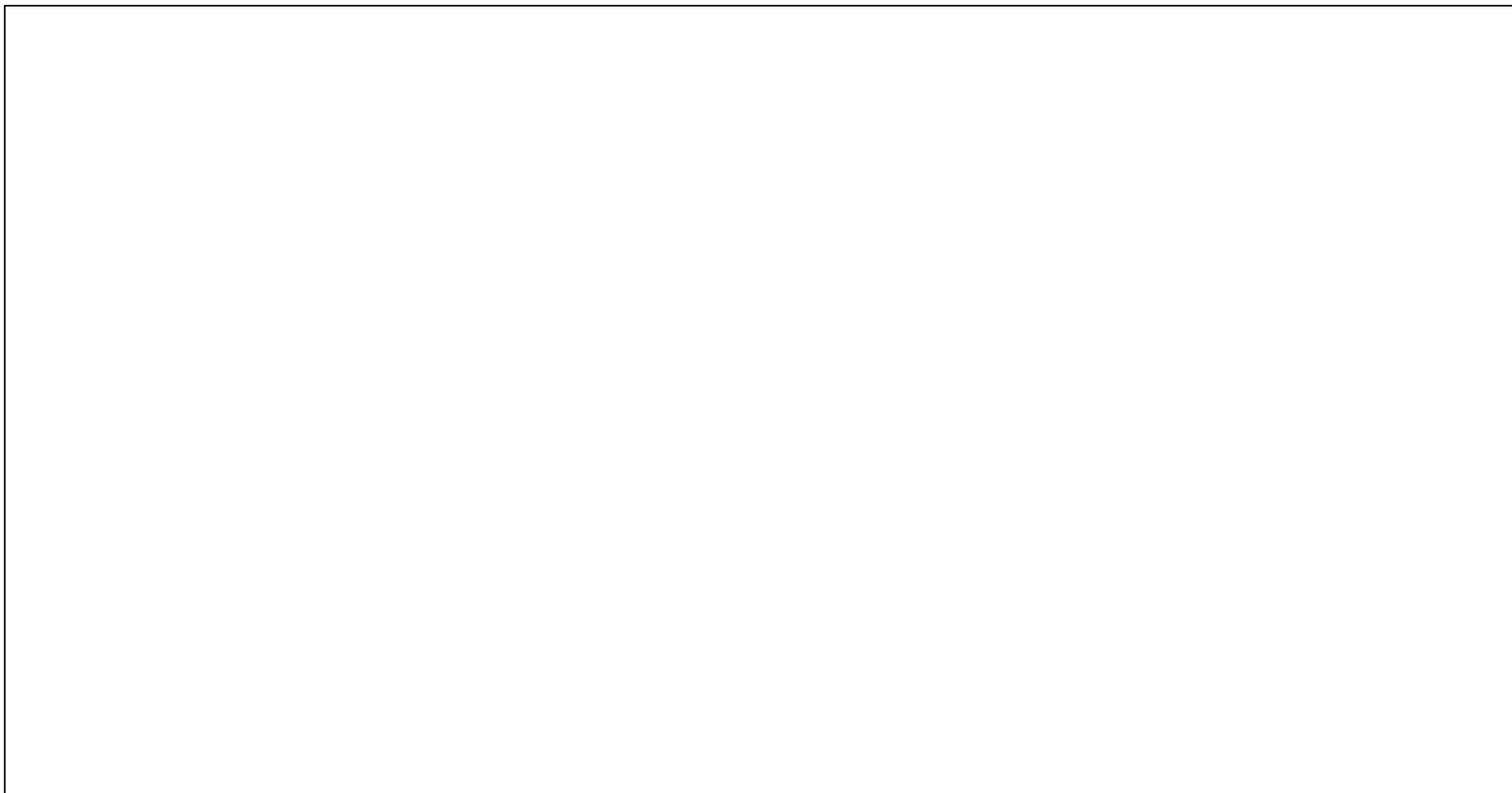
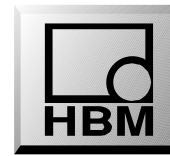
Interval poverenja

$$\varepsilon_{sr} + t \cdot s / \sqrt{n}$$

Gornja granica
poverenja

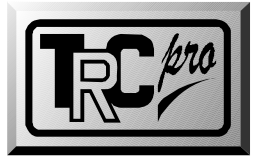
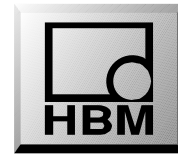
Analiza grešaka

Interv. poverenja sr. vrednosti merene veličine



Analiza grešaka

Konačan prikaz izmerenih veličina



$$y = \varepsilon_{sr} - F \pm (t/\text{sqrt}(n) \cdot s + f) \text{ za neku verovatnoću } P$$

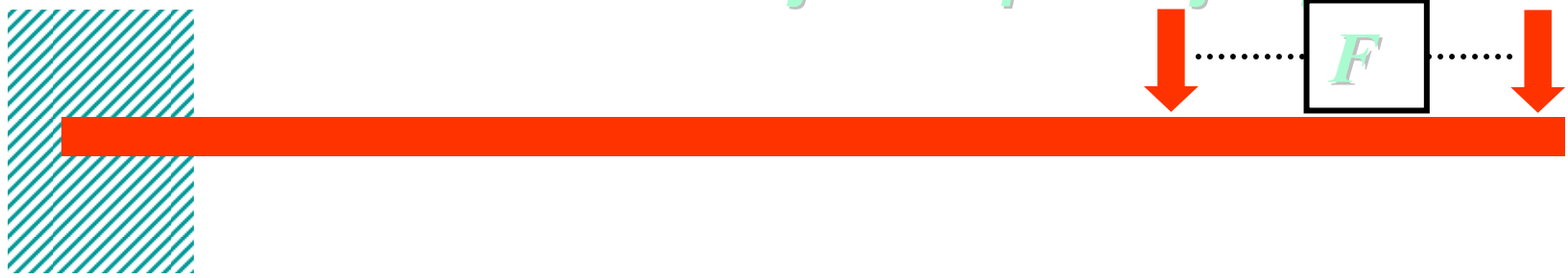
- *y = izmerena veličina*
- *ε_{sr} = srednja vrednost izmerenih uzoraka $\Sigma(\varepsilon_i / n)$*
- *F = poznata sistematska greška*
- *t/sqrt(n) = interval poverenja srednje vrednosti*
- *f = ukupna sistematska greška svih uticaja*
- *P = verovatnoća*

POSTOJI VEROVATNOĆA OD 95%, DA IZMERENA

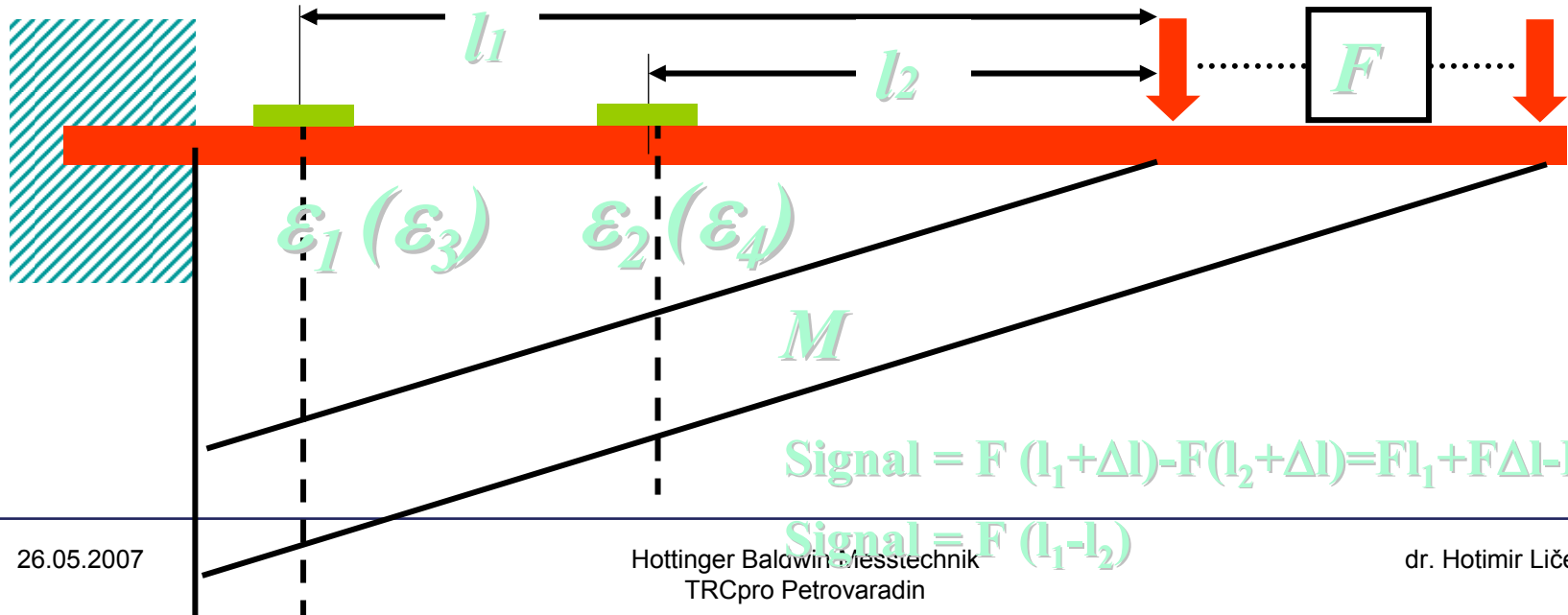
DILTACIJA ε NE ODSTUPA OD STVARNE DILATACIJE:

$$\varepsilon = \varepsilon_{sr} \pm 0.48 \cdot 2s$$

PROBLEM: Realizovati konzolu za merenje opterećenja koja neće biti osetljiva na položaj napadne tačke.



REŠENJE: Diferencijalna konzola:

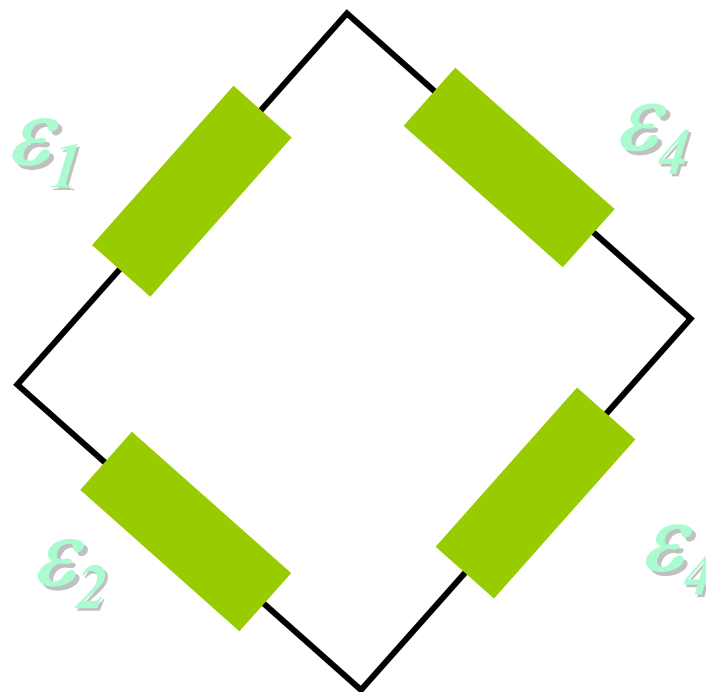


$$\text{Signal} = F (l_1 + \Delta l) - F (l_2 + \Delta l) = F l_1 + F \Delta l - F l_2 - F \Delta l$$

$$\text{Signal} = F (l_1 - l_2)$$

Veza u 1/2, (1/1) most:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4$$



Nezavisno od položaja napadne tačke sile

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \text{const.}$$

$$\varepsilon_3 - \varepsilon_4 = \text{const.}$$