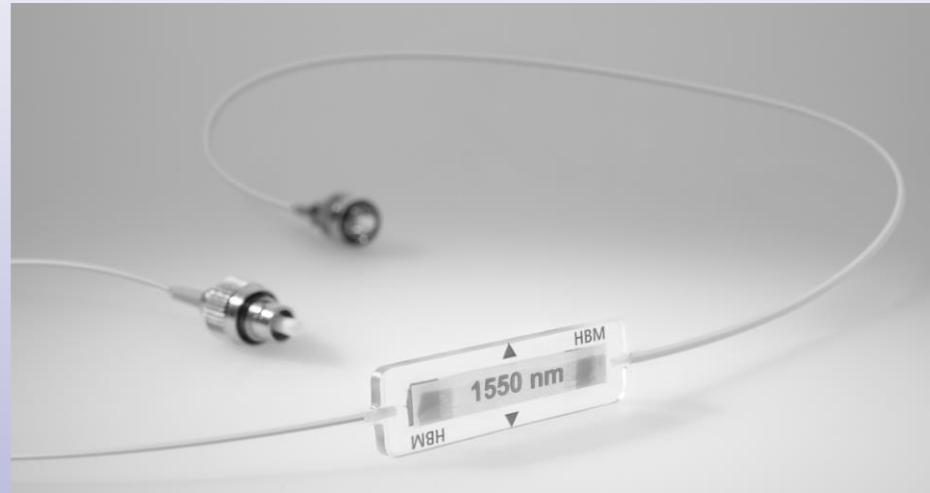
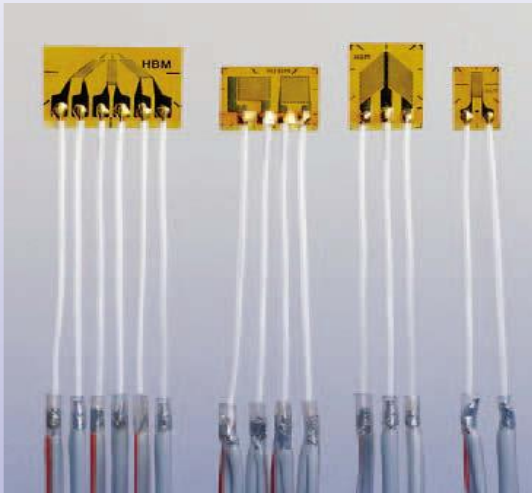


# TENZOMETRY

- Snímače pro měření relativního prodloužení při mechanickém zatěžování



- 8.1. Odporové tenzometry
- 8.2. Optické tenzometry
- 8.3. Bezkontaktní optické metody

## 8.1. ODOPROVÉ TENZOMETRY



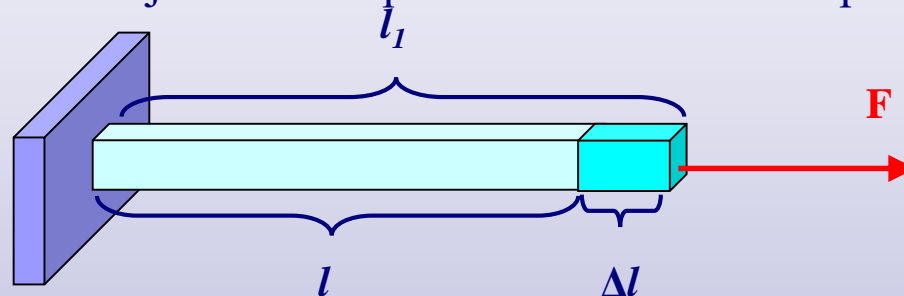
- 8.1.1. Princip měření relativního prodloužení
- 8.1.2. Kovové tenzometry
- 8.1.3. Polovodičové tenzometry
- 8.1.4. Teplotní závislost tenzometrů
- 8.1.5. Typická zapojení tenzometrů

### 8.1.1. PRINCIP MĚŘENÍ RELATIVNÍHO PRODLOUŽENÍ

#### ▪ Definice relativního prodloužení

- působením síly  $F$  na těleso dojde k jeho prodloužení z původní délky  $l$  na délku  $l_1$
- rozdíl délek se označuje jako absolutní prodloužení  $\Delta l = l_1 - l$
- relativní prodloužení  $\varepsilon$  je absolutní prodloužení vztažené k původní délce:

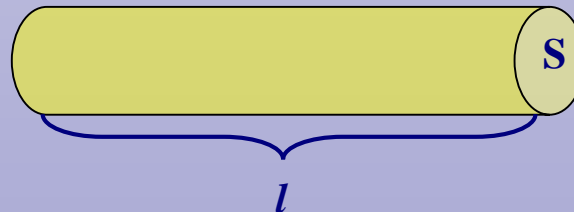
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$



#### ▪ Závislost elektrického odporu vodiče na jeho rozměrech

- již v roce 1843 zjistil Wheatstone závislost el. odporu vodiče na jeho rozměrech

$$R = \rho * \frac{l}{S}$$

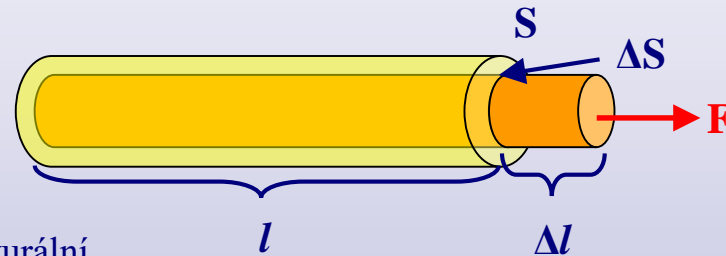


### 8.1.1. PRINCIP MĚŘENÍ RELATIVNÍHO PRODLOUŽENÍ

- **Je-li vodič mechanicky namáhán, změní se jeho:**
  - délka o hodnotu  $\Delta l$
  - průřez o hodnotu  $\Delta S$
  - měrný odpor o hodnotu  $\Delta \rho$  (vlivem mikrostrukturální změny materiálu)
  - relativní změna odporu vodiče:

$$\frac{\Delta R}{R} = \underbrace{\frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S}}_{\text{geometrické změny}} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

geometrické změny      mikrostrukturální změny



pokud dosadíme  $\frac{\Delta l}{l} = \varepsilon$  a přes Poissonovu konstantu  $\frac{\Delta S}{S} = -2\mu * \frac{\Delta l}{l}$

můžeme vyjádřit rel. změnu odporu jako polynom  $\frac{\Delta R}{R} = c_1 \varepsilon + c_2 \varepsilon^2 + c_3 \varepsilon^3 + \dots$

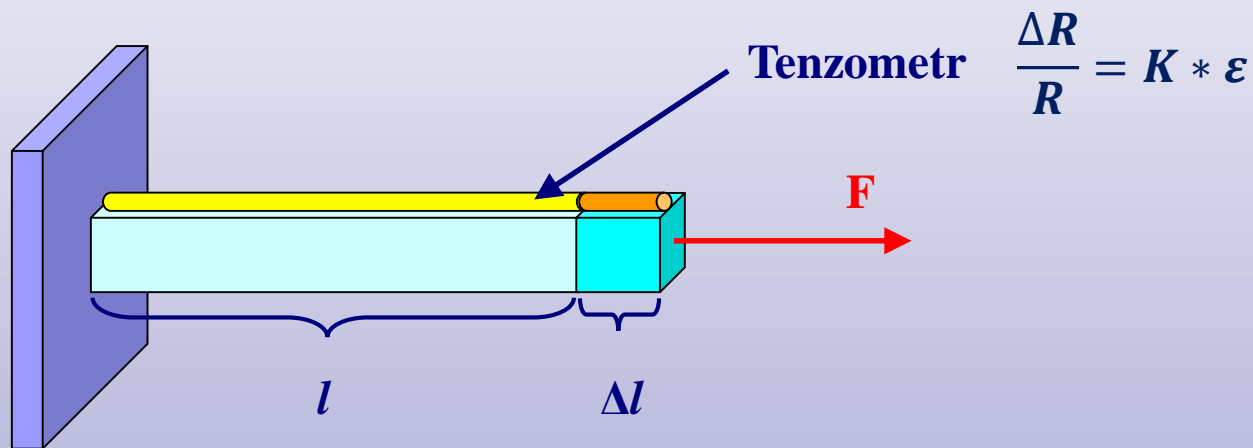
pro malé deformace a vhodně zvolené materiály lze zanedbat mikrostrukturální změny a tím i vyšší členy polynomu a pak platí, že

relativní změna odporu je přímo úměrná relativnímu prodloužení  $\frac{\Delta R}{R} = K * \varepsilon$

### 8.1.1. PRINCIP MĚŘENÍ RELATIVNÍHO PRODLOUŽENÍ

#### ▪ Tenzometr

- vodič připevněný (nejčastěji přilepený) na povrch objektu
- deformuje spolu s objektem
- relativní změna jeho odporu je přímo úměrná relativnímu prodloužení objektu



- součinitel **K** je **tenzometrická konstanta** (součinitel deformační citlivosti)
  - její hodnota závisí na typu materiálu vodiče

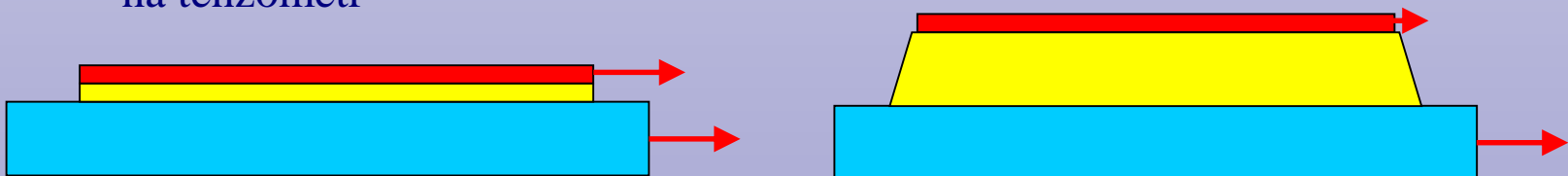
### 8.1.1. PRINCIP MĚŘENÍ RELATIVNÍHO PRODLOUŽENÍ

#### ▪ Nalepení tenzometru

- aplikační sada (kufřík) s potřebnou výbavou
- speciální lepidla, která přenesou deformaci na tenzometr
- jednosložkové kyanoakralátové (vteřinové) pro krátkodobé aplikace
- dvousložkové epoxidy pro dlouhodobé použití
- epoxidy vytvrzované za tepla pro větší teplotní rozsah

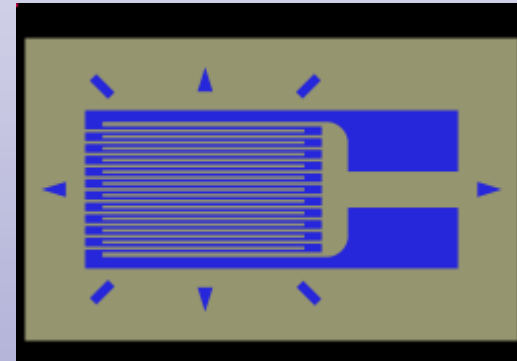
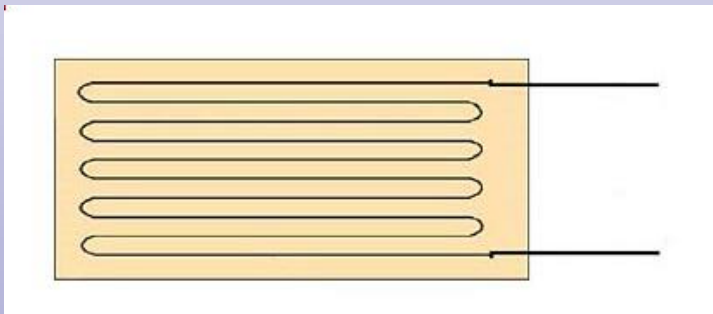


- nutno dodržet správnou technologii lepení, aby se deformace materiálu přenesla na tenzometr



## 8.1.2. KOVOVÉ TENZOMETRY

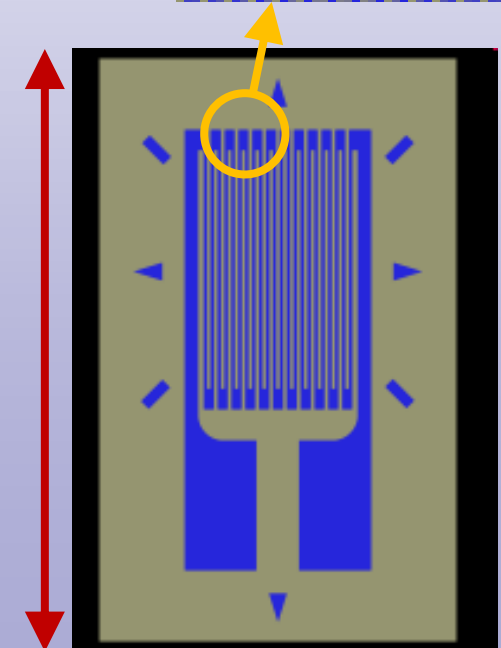
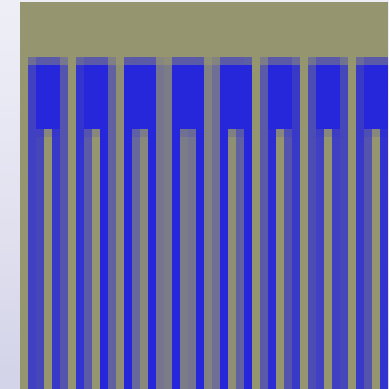
- **Drátkové**
  - drátek nalepený na papírové podložce
  - historické řešení, dnes se již nepoužívá
- **Fóliové**
  - kovová vrstva litograficky nanesená na podložce
  - v současnosti nejrozšířenější řešení
- **Vrstvové**
  - kovová vrstva nanesená přímo na objekt
  - jen pro speciální aplikace



- **aby byla změna odporu větší, používá se vodič ve tvaru meandru**
  - větší délka vodiče, větší celkové prodloužení vodiče, větší změna odporu

## 8.1.2. KOVOVÉ TENZOMETRY

- **Fóliové**
  - typická hodnota odporu  $120\Omega$ ,  $350\Omega$
  - kovová vrstva tloušťky  $5\ \mu\text{m}$
  - podložka (např. polyamid)  $20\ \mu\text{m}$
  - **K = cca 2** (dle materiálu kovové vrstvy)
  - $\varepsilon_{\text{PRAC}} = \pm 0,15\%$  (provozní deformace)
  - $\varepsilon_{\text{MAX}} = \pm 0,5\%$  (max. deformace – spec. typy)
  - $\varepsilon_{\text{MIN}} = \text{cca } 1\ \mu\text{m/m}$
  - $10^7$  cyklů
  - pájecí plošky nebo drátkové vývody
- **Tenzometr měří prodloužení vždy ve směru meandru**
  - **příčná citlivost**
    - citlivost na deformaci v bočním směru
    - je nežádoucí hlavně při víceosých aplikacích
    - snižuje se speciálním provedením meandru

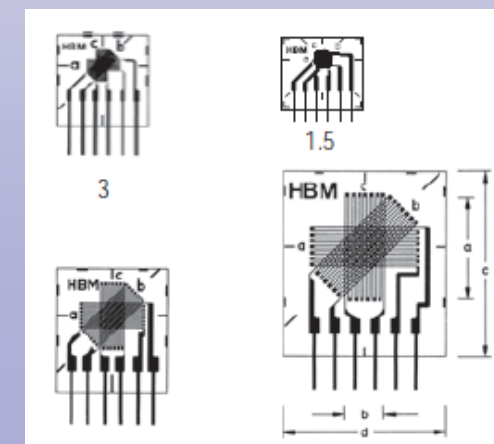
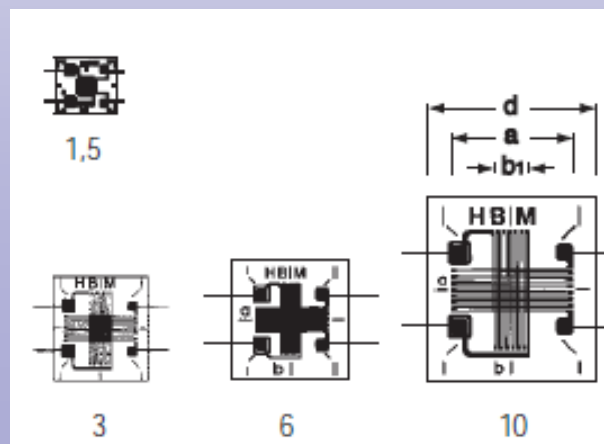
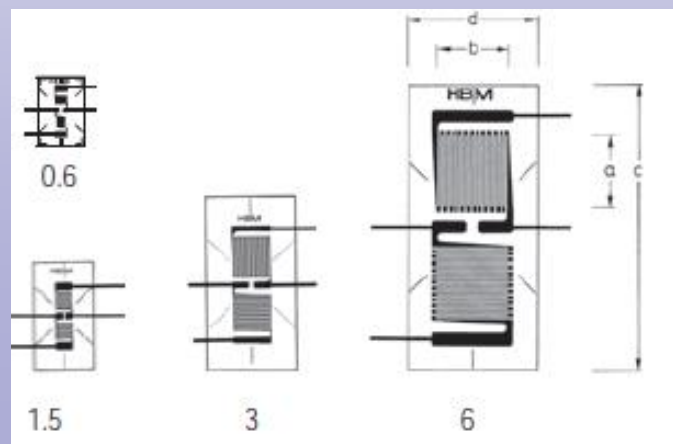
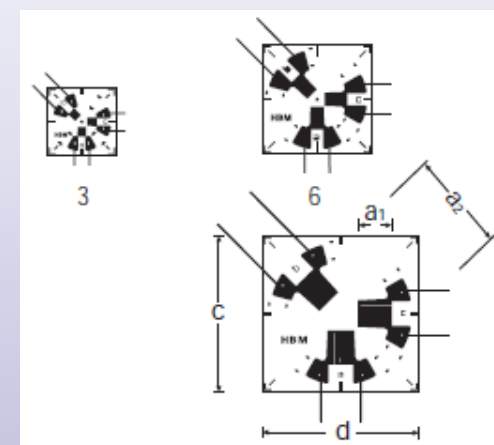
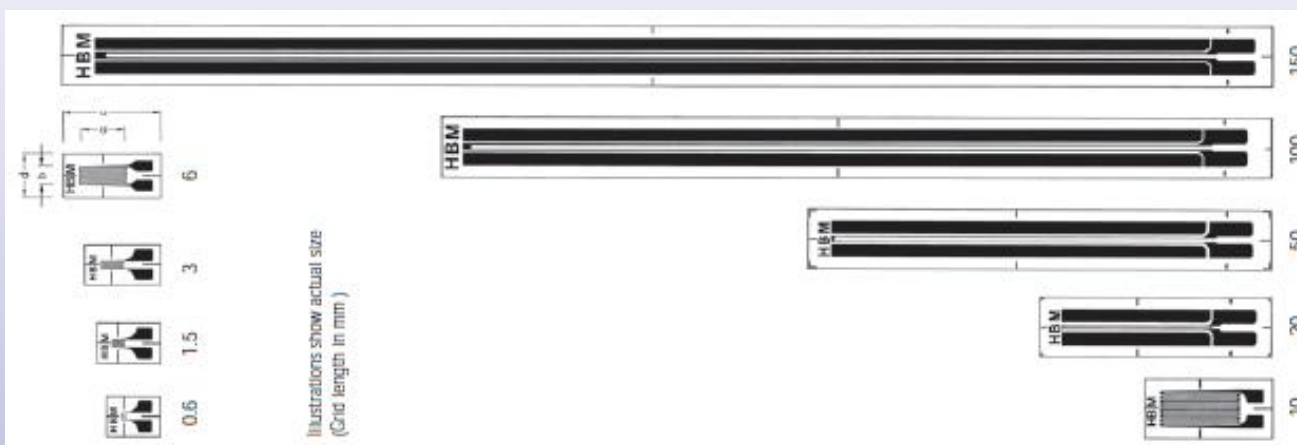




### 8.1.2. KOVOVÉ TENZOMETRY

- **Foliové – praktické provedení**
  - široká škála délek (0.6 až 150mm)
  - jednoosé, dvouosé, různice

Podrobnosti na [www.hbm.cz](http://www.hbm.cz)  
[www.vishay.com/strain-gages](http://www.vishay.com/strain-gages)



### 8.1.3. POLOVODIČOVÉ TENZOMETRY

#### ▪ Monokrystalické

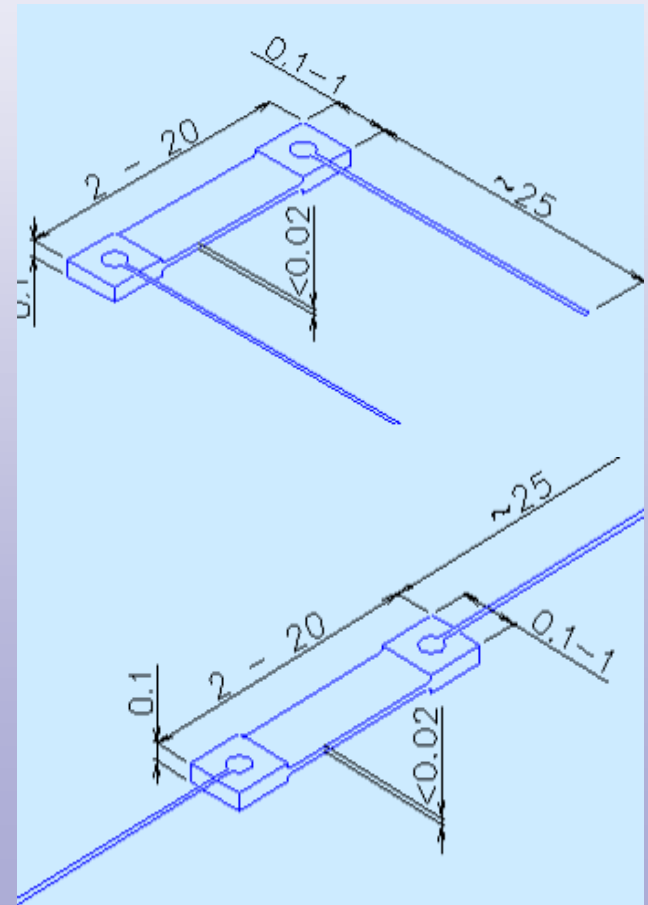
- výřez křemíkového krystalu
- i pro malé deformace vznikají mikrostrukturální změny v materiálu

- nelineární závislost  $\frac{\Delta R}{R} = c_1 \varepsilon + c_2 \varepsilon^2$

- $c_1 = \text{cca } 120$ ,  $c_2 = \text{cca } 4000$

- tedy cca 60x citlivější než foliové

- $\varepsilon_{\text{MAX}} = \pm 0,3\%$



### 8.1.3. POLOVODIČOVÉ TENZOMETRY

- **Praktické provedení**
  - tyčinka krystalu s drátkovými vývody
    - axiální nebo kolmé provedení vývodů
  - typická hodnota odporu  $120\Omega$ ,  $350\Omega$ ,  $1000\Omega$
  - jen jednoosé provedení
  - délky od 3 do 10 mm
  - na podložce nebo bez podložky
    - v provedení bez podložky nutno odizolovat od vodivého podkladu (lak, vrstva lepidla)

Podrobnosti na [www.vtsz.cz](http://www.vtsz.cz)



### 8.1.4. TEPLOTNÍ ZÁVISLOST TENZOMETRŮ

- změna teploty způsobí:

- teplotní dilataci materiálu

ferritic steel

$$\alpha = 10.8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

aluminum

$$\alpha = 23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

austenitic steel

$$\alpha = 16 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

silica

$$\alpha = 0.5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

titanium, gray cast iron

$$\alpha = 9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

plastic

$$\alpha = 65 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

molybdenum

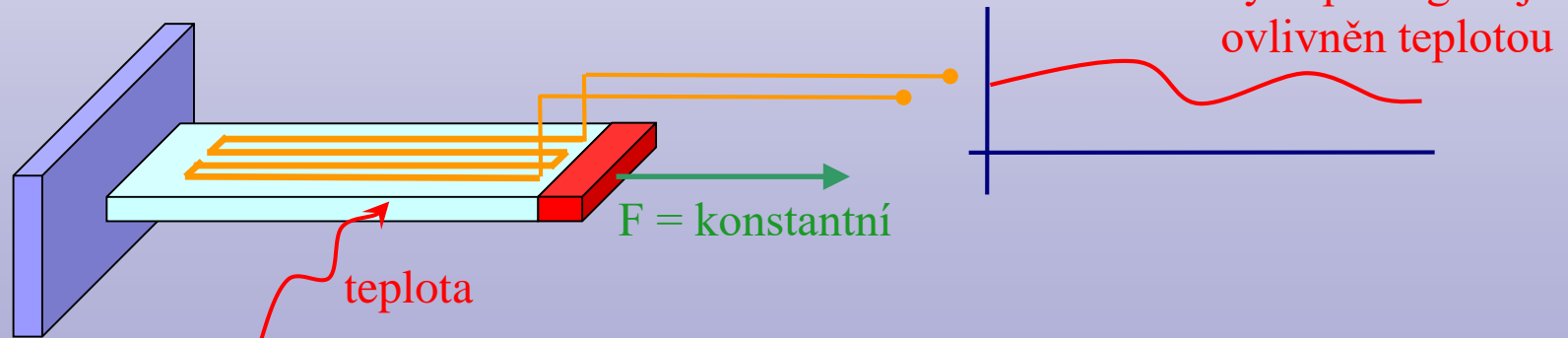
$$\alpha = 5.4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

- změnu K tenzometru

$$\alpha_K = 115 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

- změnu odporu tenzometru

$$\alpha_R = 2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$



- omezení teplotní závislosti:

- samokompenzační tenzometr
- systém zapojení tenzometru

### 8.1.4. TEPLOTNÍ ZÁVISLOST TENZOMETRŮ

#### ▪ příklad:

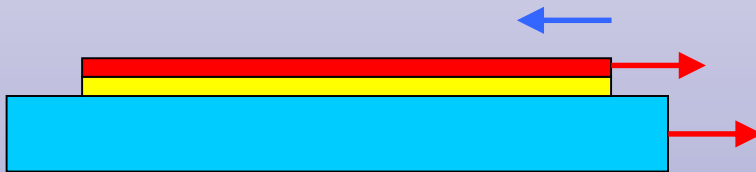
- ocelové těleso s tenzometrem pro vážení břemena
  - průřez zvolen tak, aby hmotnost 1kg způsobila  $\varepsilon = 1\mu\text{m}/\text{m}$
  - display měřidla interpretuje každý  $1\mu\text{m}/\text{m}$  rel. prodloužení jako 1kg
  - zavěšeno břemeno 500kg, tj.  $\varepsilon = 500\mu\text{m}/\text{m}$
  - display měřidla ukazuje **500kg**
  
- teplota okolí se změní o **1°C**
  - $\alpha_{\text{OCEL}} \quad 10,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 
    - rel. prodloužení oceli od teploty 1°C  $\times 10,8 \times 10^{-6} = 10,8\mu\text{m}/\text{m}$
    - celkové rel. prodloužení tělesa (zátěž+teplota) měřené tenzometrem je  $\varepsilon = 510,8\mu\text{m}/\text{m}$
  - tenzometr  $120\Omega, K=2, \alpha_K = 115 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 
    - změna K tenzometru při změně teploty o 1°C :  $\Delta K = 0,0015$
    - odchylka měření  $\Delta Y = \Delta K \cdot X = 0,0015 \cdot 510,8 \cdot 10^{-6} = 0,77\mu\text{m}/\text{m}$
  - tenzometr dává údaj o rel. prodloužení tělesa  $\varepsilon = 510,8 + 0,77 = 511,57\mu\text{m}/\text{m}$
  - display měřidla ukazuje **511,57kg**



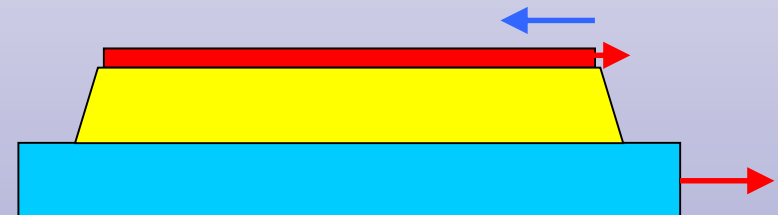
- **změna teploty o jediný 1°C způsobila chybu měření o cca 11,5 kg, tj. 2,3%**

### 8.1.4. TEPLOTNÍ ZÁVISLOST TENZOMETRŮ

- **samokompenzační tenzometry**
  - jen foliové
  - vhodnou volbou materiálu tenzometru lze nastavit jeho teplotní součinitel obráceně než působí teplotní dilatace měřeného materiálu
    - o co se odpor zvětší vlivem teplotní dilatace materiálu, o to se zmenší vlivem vhodně zvoleného teplotního součinitele  $\alpha$  materiálu vlastního tenzometru
  - speciální typy pro různé materiály
    - ocel a hliník standardně v nabídce, další materiály na objednávku
  - je potřeba dodržet přesně technologii lepení, aby nedocházelo ke změně vlastností vlivem vrstvy lepidla



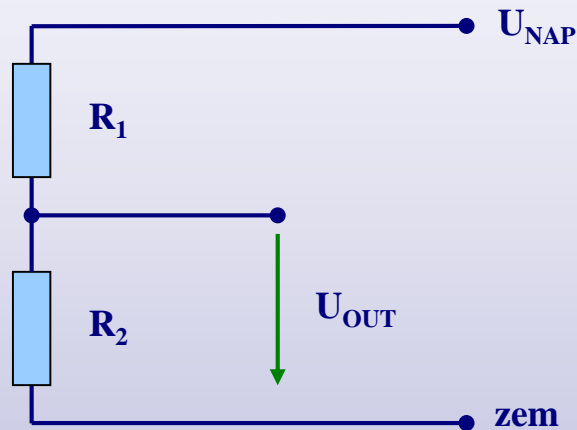
Teplotní dilatace materiálu se plně přeneše na tenzometr a kompenzace nastavená pro tento materiál ji vyruší



Teplotní dilatace materiálu se vlivem chyby v lepení nepřeneše zcela na tenzometr, ale ten kompenzuje jako by se přenesla – je „překompenzováno“ – chyba

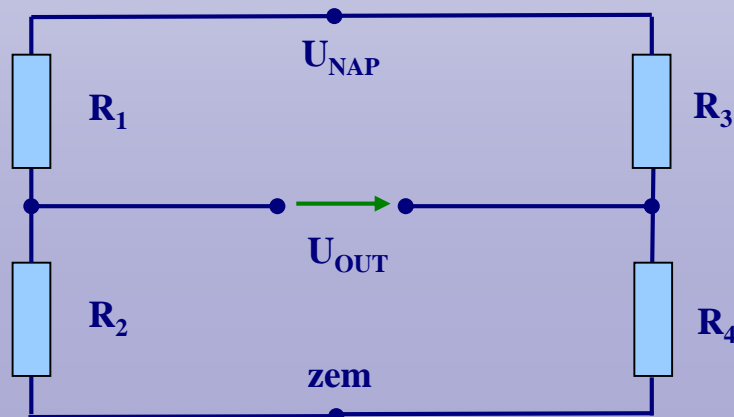
### 8.1.5. TYPICKÁ ZAPOJENÍ TENZOMETRŮ

- $\Delta R$  se většinou převádí na změnu napětí
  - napěťový dělič



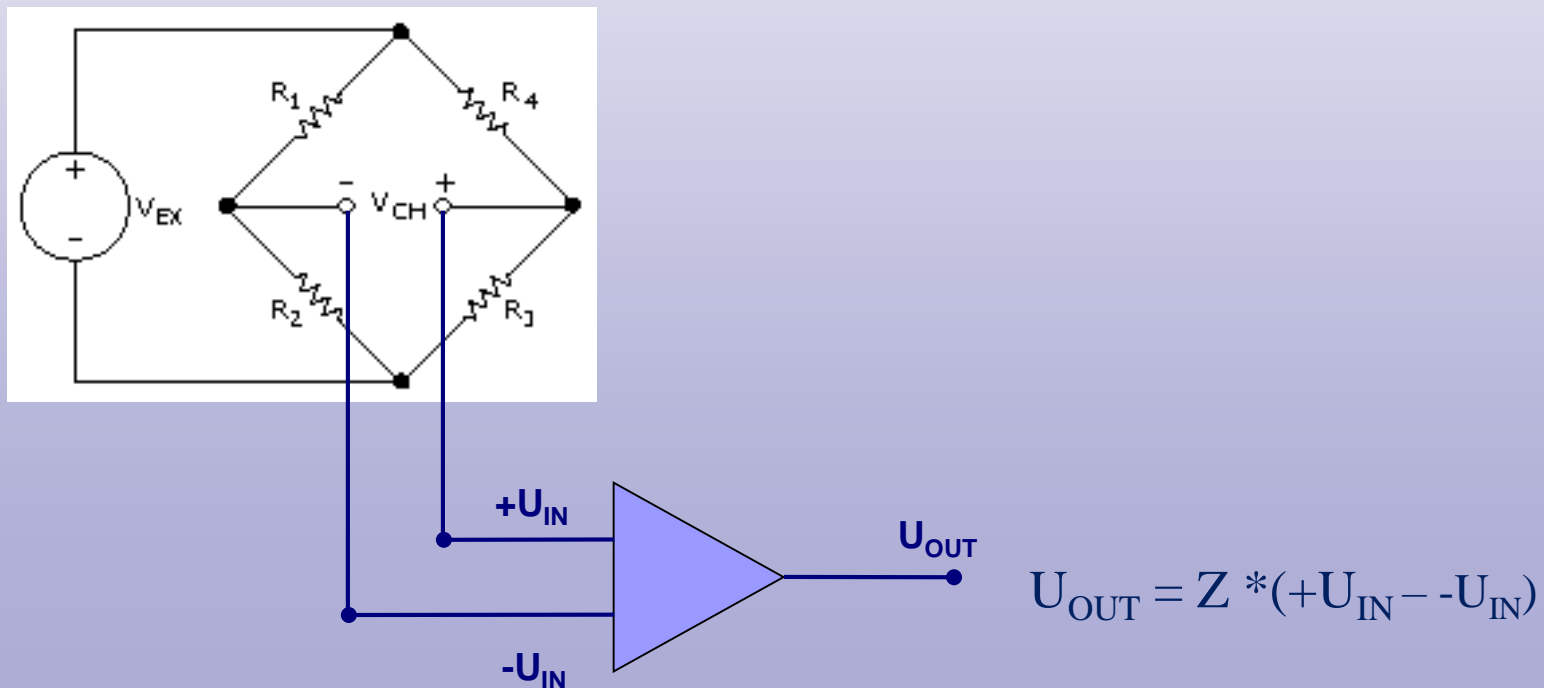
$$U_{OUT} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} * U_{NAP}$$

- protože změna odporu tenzometru je malá používá se pro vyhodnocení prakticky výhradně Wheatstonův můstek (tj. vlastně dva napěťové děliče)



## 8.1.5. TYPICKÁ ZAPOJENÍ TENZOMETRŮ

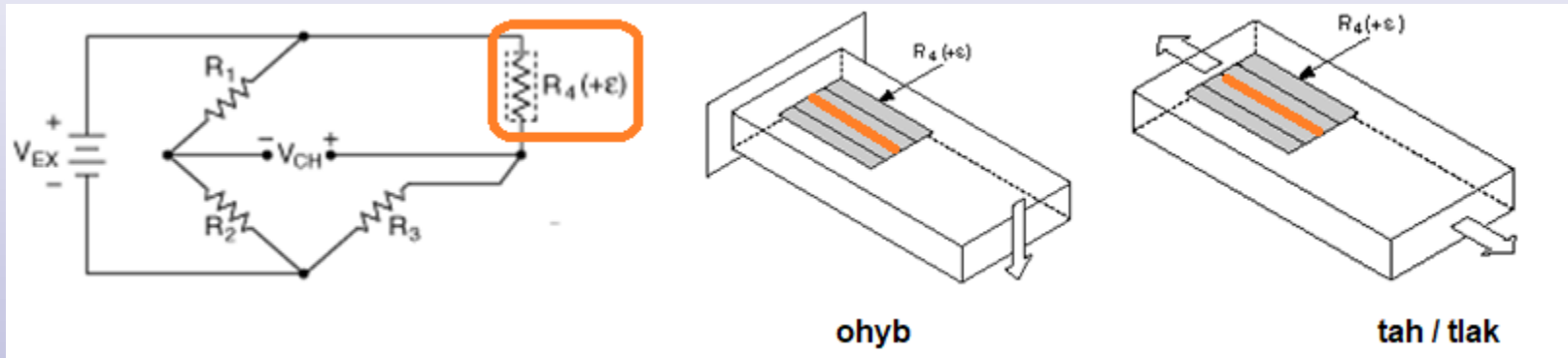
- **Wheatstonův můstek**
  - je tvořen čtyřmi tenzometry
  - do jedné diagonály se přivede napájení
  - v druhé diagonále se měří napětí
  - vyhodnocení diferenciálním zesilovačem
  - některé tenzometry ve Wheatstonově můstku lze nahradit pevnými odpory
    - od toho se pak odvozuje název zapojení





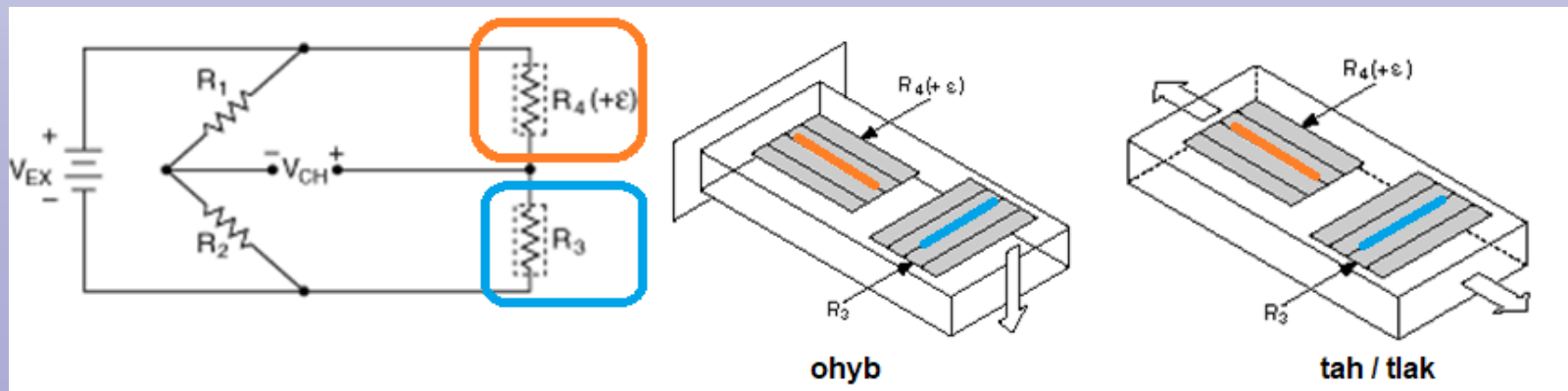
## 8.1.5. TYPICKÁ ZAPOJENÍ TENZOMETRŮ

- jeden tenzometr – čtvrtmůstek
  - tah i ohyb
  - jeden aktivní tenzometr, tři pevné odpory
  - toto zapojení nijak **nekompenzuje vliv teploty**



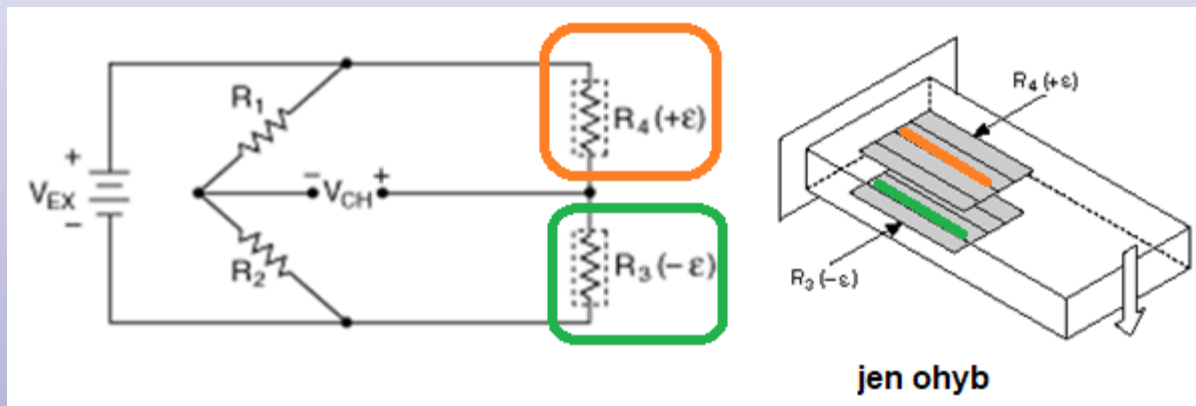
### 8.1.5. TYPICKÁ ZAPOJENÍ TENZOMETRŮ

- dva tenzometry – **polomůstek** – varianta 1 = **jeden aktivní tenzometr**
  - **tah i ohyb**
  - dva tenzometry, dva pevné odpory
    - jeden aktivní měří  $\varepsilon$
    - jeden kompenzační neměří  $\varepsilon$ , je jen pro kompenzaci teploty,
      - při tahu je ovlivněn příčnou deformací tělesa, nutno zahrnout do vyhodnocení (Poissonova konstanta)
  - toto zapojení **kompenzuje vliv teploty**
    - materiál dilataje v obou směrech shodně
    - oba tenzometry reagují na teplotu shodně, protože jsou oba zapojeny v jedné větvi můstku, změna se vyruší
    - předpokládá se že teplota obou tenzometrů je shodná



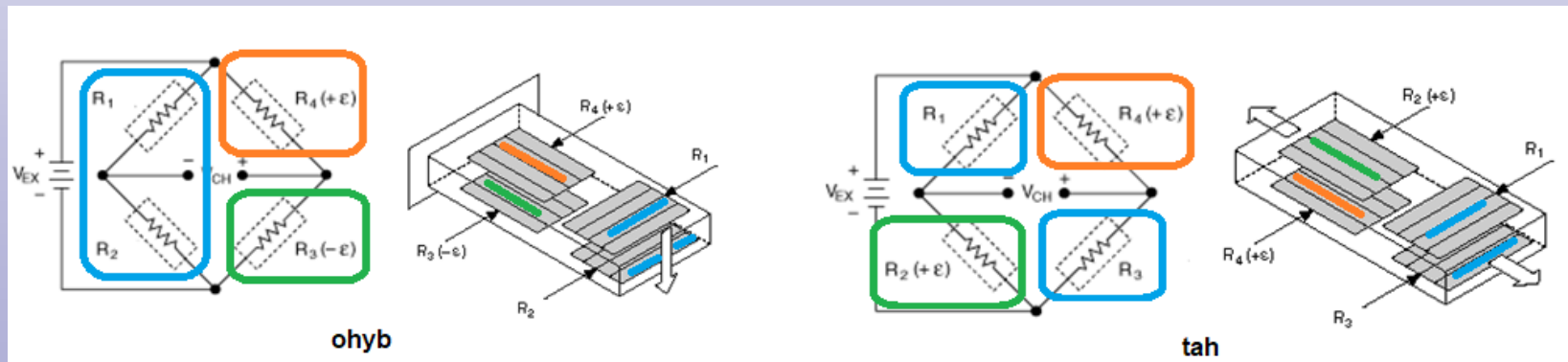
### 8.1.5. TYPICKÁ ZAPOJENÍ TENZOMETRŮ

- dva tenzometry – **polomůstek** – varianta 2 = **dva aktivní tenzometry**
  - **jen ohyb**
  - dva tenzometry, dva pevné odpory
    - jeden měří prodlužování, druhý zkracování ohýbaného materiálu
  - **dvojnásobná citlivost**
  - toto zapojení **kompenzuje vliv teploty** (shodný princip jako v minulém zapojení)



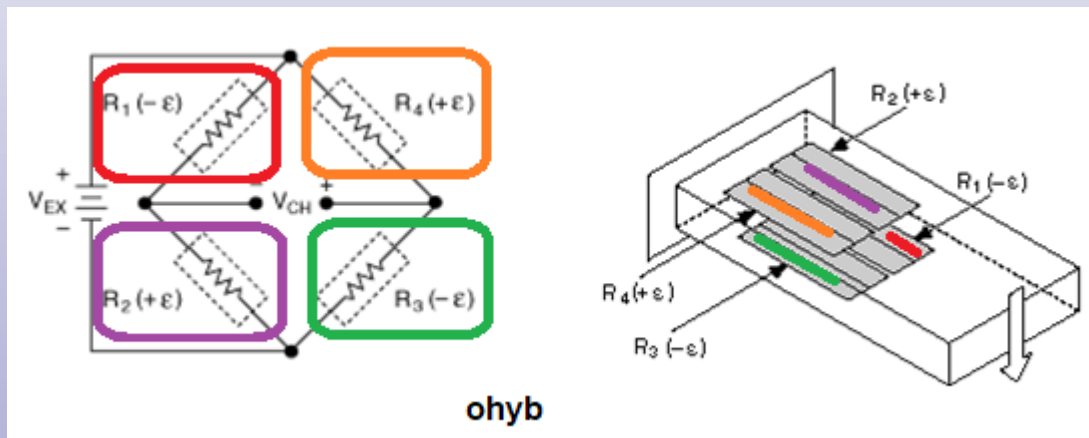
### 8.1.5. TYPICKÁ ZAPOJENÍ TENZOMETRŮ

- čtyři tenzometry – **plný můstek** – varianta 1 = **dva aktivní tenzometry**
  - **tah i ohyb**
  - čtyři tenzometry
    - dva aktivní měří  $\epsilon$
    - dva kompenzační – neměří  $\epsilon$ , jsou jen pro kompenzaci teploty,
      - při tahu jsou ovlivněny příčnou deformací tělesa, nutno zahrnout do vyhodnocení (Poissonova konstanta)
  - **dvojnásobná citlivost**
  - toto zapojení **kompenzuje vliv teploty** (shodný princip jako v minulém zapojení)



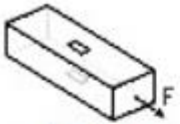
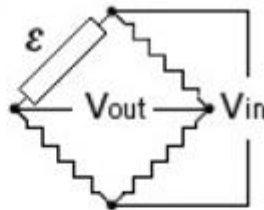
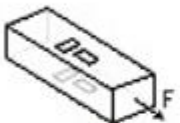
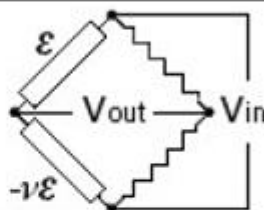

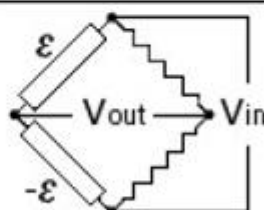
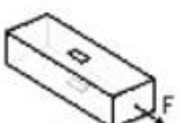
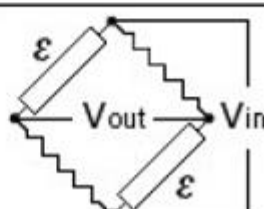
### 8.1.5. TYPICKÁ ZAPOJENÍ TENZOMETRŮ

- čtyři tenzometry – **plný můstek** – varianta 2 = **čtyři aktivní tenzometry**
  - **jen ohyb**
  - čtyři aktivní tenzometry
    - dva měří prodlužování, dva zkracování ohýbaného materiálu
    - **čtyřnásobná citlivost**
  - toto zapojení **kompenzuje vliv teploty** (shodný princip jako v minulém zapojení)




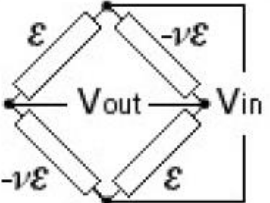
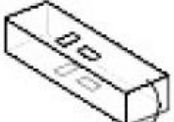
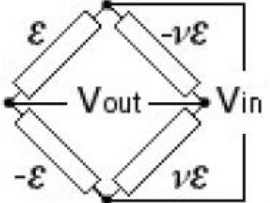
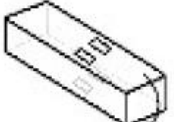
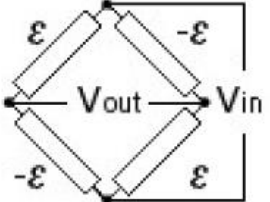
### 8.1.5. TYPICKÁ ZAPOJENÍ TENZOMETRŮ

- celkem 7 variant nalepení a zapojení
  - vzorce pro přepočet měřeného napětí z Wheatstonova můstku na rel. prodloužení  $\epsilon$

MEASURES	TYPE	BRIDGE	EQUATION $V_{out}/V_{in}$	BRIDGE FACTOR	LINEAR	DESCRIPTION
 tension, compression	quarter		$\frac{k \cdot \epsilon}{4 + 2 \cdot k \cdot \epsilon}$	1	no	Single gage measuring tension and compression - basic configuration
 tension, compression	half		$\frac{k \cdot \epsilon \cdot (1 + \nu)}{4 + 2 \cdot k \cdot \epsilon \cdot (1 - \nu)}$	(1+ν)	no	One gage in principal direction and one in transverse direction - usually used for temperature compensation
 bending	half		$\frac{k \cdot \epsilon}{2}$	2	yes	Two gages with opposite strain - usually used for measurement of bending
 tension, compression	half		$\frac{k \cdot \epsilon}{2 + k \cdot \epsilon}$	2	no	Two gages with same strain - usually used for bending cancellation

### 8.1.5. TYPICKÁ ZAPOJENÍ TENZOMETRŮ

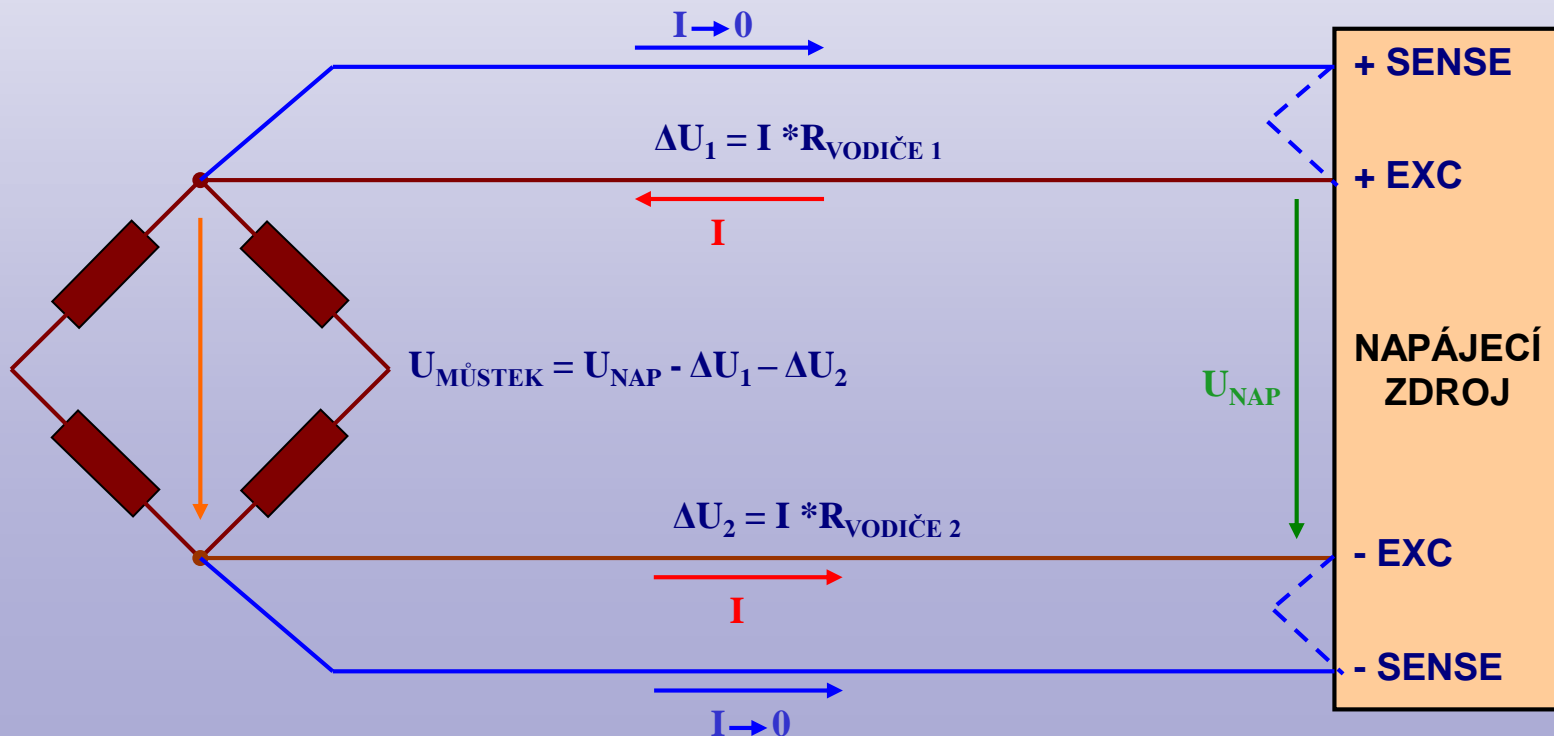
- celkem 7 variant nalepení a zapojení
  - vzorce pro přepočítání měřeného napětí z Wheatstonova můstku na rel. prodloužení  $\epsilon$

MEASURES	TYPE	BRIDGE	EQUATION $V_{out}/V_{in}$	BRIDGE FACTOR	LINEAR	DESCRIPTION
 <p>tension, compression</p>	full		$\frac{k \cdot \epsilon \cdot (1 + \nu)}{2 + k \cdot \epsilon \cdot (1 - \nu)}$	$2 \cdot (1 + \nu)$	no	Two pairs of gages where one is in the principal direction and the other one is in transverse direction used in temperature compensation and bending cancellation
 <p>bending</p>	full		$\frac{k \cdot \epsilon \cdot (1 + \nu)}{2}$	$2 \cdot (1 + \nu)$	yes	Two pairs of gages where one is in the principal direction and the other one is in transverse direction used in temperature compensation and tension cancellation
 <p>bending, torsion</p>	full		$k \cdot \epsilon$	4	yes	Two pairs of gages in opposite strain - usually used for measurement of bending

- výstupní napětí závisí na napájení
  - můstková zapojení tenzometrů vyžadují stabilní a přesný zdroj napájení

## 8.1.5. TYPICKÁ ZAPOJENÍ TENZOMETRŮ

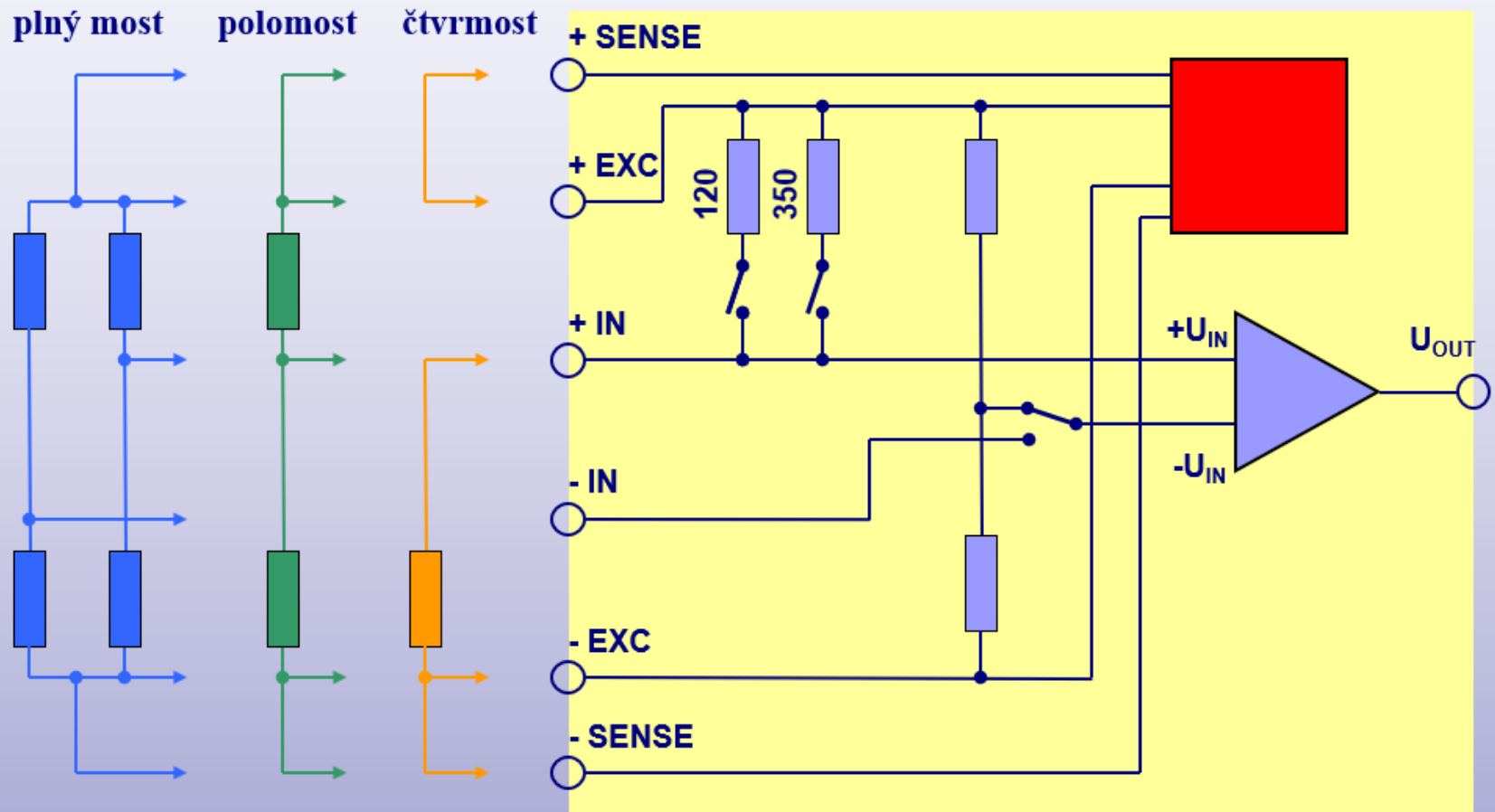
- **kompence úbytku napájení na vodičích**
  - napájecí zdroj odměřuje skutečné napětí na můstku
    - měřicí vodiče prakticky nezatíženy proudem, tj. bez úbytku
  - napájecí zdroj zvýší  $U_{NAP}$  tak, aby na můstku bylo požadované napětí
  - **vstupy SENSE nesmí zůstat nezapojeny!**
    - nepoužijí-li se, je potřeba je propojit s výstupy napájení



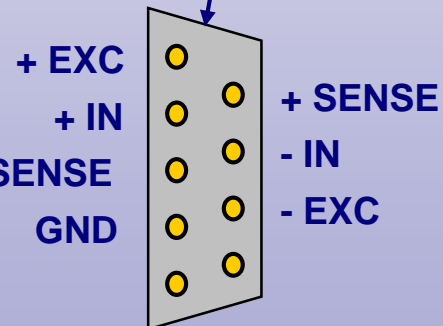


### 8.1.5. TYPICKÁ ZAPOJENÍ TENZOMETRŮ

- **Praktická realizace moderního měřicího zařízení pro tenzometry**
  - diferenciální zesilovač
  - rezistory pro kompletaci můstku
  - přesný napájecí zdroj s kompenzací úbytku na vodičích



### 8.1.5. TYPICKÁ ZAPOJENÍ TENZOMETRŮ

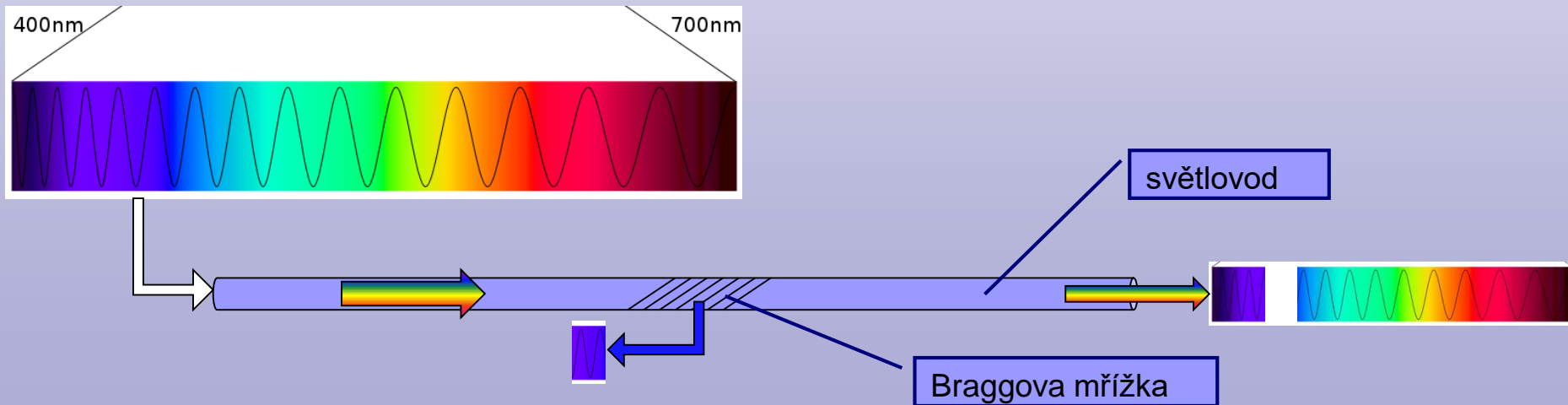


	DAQP-BRIDGE-A
Gain:	20 to 1000
Input ranges:	±5, ±10, ±25, ±50, ±100, ±250 mV
@ 5 V <sub>DC</sub> excitation:	±1, ±2, ±5, ±10, ±20, ±50 mV/V
Range selection:	Push button or software
Input impedance:	> 100 MOhm
DC accuracy:	±0.1 %
Gain linearity:	±0.05 %
Excitation voltage:	0.25, 0.5, 1, 2.5, 5 and 10 V <sub>DC</sub> software programmable (5 V <sub>DC</sub> = default setting)
Accuracy:	0.05 % ±1 mV
Drift:	typ. 20 ppm (max. 40 ppm)
Protection:	Continuous short to ground
Bridge types:	Full bridge ½ bridge with internal completion (software programmable) ¼ bridge with internal resistor for 120 and 350 Ohm (software programmable)
Bridge resistance:	120 Ohm to 10 kOhm (down to 87 Ohm on request)
Shunt calibration:	Two internal shunt resistors or external resistor for shunt calibration (175k & 59k88)
Zero adjust:	Full automatic, ±200 % of F.S. (via push button or software)
Bandwidth (-3 dB):	20 kHz (±1.5 dB @ f <sub>0</sub> )
Filters (lowpass):	10 Hz, 100 Hz, 1 kHz, 5 kHz, 20 kHz (±1.5 dB @ f <sub>0</sub> )
Filter selection:	Push button or software
Filter characteristics:	Bessel or Butterworth (software programmable) 40 dB / decade (12 dB / octave)
Typ. SNR @ max. bandwidth:	71 dB @ Gain 1000 79 dB @ Gain 20
Typical CMRR:	73 dB @ 0 Hz 71 dB @ 400 Hz 70 dB @ 1 kHz
Overvoltage protection:	±10 V <sub>DC</sub>
Isolation:	350 V <sub>DC</sub> (for input and excitation)
Output voltage:	±5 V
Output resistance:	< 10 Ohm
Output current:	Max. 5 mA
Output protection:	Continuous short to ground
RS-485 interface:	Yes
TEDS support:	No
MSI support:	Manually support of MSI-BR-TH-x adapter
Power supply voltage:	±9 V <sub>DC</sub> (±1 %)
Power consumption:	Typ. 1.44 W @ 350 Ohm, 1.83 W @ 120 Ohm (both full bridge @ 5 V <sub>DC</sub> excitation) Max: 3 W (depending on sensor)*

## 8.2. OPTICKÉ TENZOMETRY

### ▪ princip činnosti

- odraz světla na Braggově mřížce
  - vytvořena rytím nebo laserem uvnitř světlovodného vlákna
  - rozteč mřížky je úměrná jedné vlnové délce světla
  - světlo shodné vlnové délky se odrazí, ostatní projde
- deformací mřížky se změní její rozteč
  - odrazí se jiná část spektra
- deformace mřížky
  - mechanickým namáháním
  - teplotou



## 8.2. OPTICKÉ TENZOMETRY

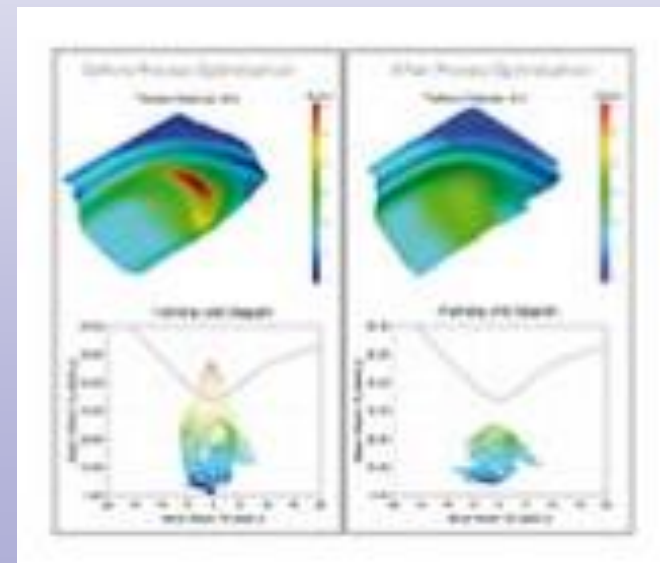
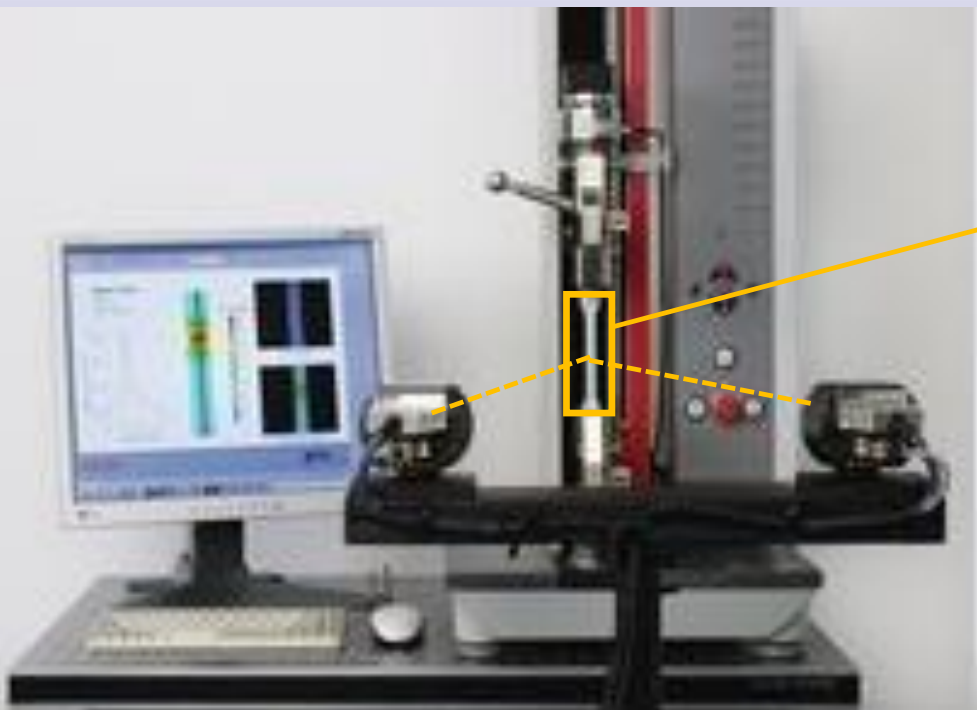
- **Praktické provedení a základní charakteristika**
  - jedna mřížka na vlákně
  - více mřížek na jednom vlákně
    - naladěny na různé části spektra
  - v místě mřížky ploška k nalepení
    - k instalaci na povrch měřeného dílu
    - lepení shodné s odporovými
  - bez plošky
    - mřížka přímo v optickém vlákně
    - k instalaci do měřeného dílu při jeho výrobě
      - kompozity, betonové konstrukce, ...
  - pro vyhodnocení nutné speciální měřicí zařízení
    - v podstatě spektrometr
- **Výhody**
  - vláknem prochází světlo, ne elektrický proud
    - nejsou rušeny elektromagnetickým polem
    - lze použít ve výbušném prostředí
- **Nevýhody**
  - cenově náročná speciální elektronika na vyhodnocení

detaily např. na [www.hbm.cz](http://www.hbm.cz)



### 8.3. BEZKONTAKTNÍ OPTICKÉ METODY

- princip činnosti
  - softwarové vyhodnocení obrazu u kamery
  - snímání pohybu struktury naneseného vzoru nebo měrných bodů
    - na tělese vytvořen kontrastní nástřík nebo nalepeny měřicí body
    - těleso se snímá se kamerou (kamerami)
    - pohyb struktury nástříku nebo bodů odpovídá deformaci tělesa



### 8.3. BEZKONTAKTNÍ OPTICKÉ METODY

#### ■ Praktické provedení a základní charakteristika

- jedna nebo dvě kamery
  - 2D nebo 3D měření
- součásti systému
  - systém světel pro kvalitní osvětlení povrchu
  - kalibrační sada na výchozí nastavení systému
- velký rozsah velikosti vzorků (desítky mm až jednotky m)

detaily např. na [www.mcae.cz](http://www.mcae.cz)

#### ■ Výhody

- bezkontaktní metoda
- jednoduchá příprava vzorku
  - nástřík nebo nalepení bodů
- velký rozsah velikosti vzorků

#### ■ Nevýhody

- cenově náročné zařízení HW+SW
- kritéria na prostředí
  - osvětlení
  - prostor na stabilní umístění kamer
  - bez vibrací



### KONTROLNÍ OTÁZKY

- princip měření relativního prodloužení
  - definice relativního prodloužení (str. 3)
  - princip funkce tenzometru (str. 5)
- fóliové tenzometry
  - základní vlastnosti a praktické provedení (str. 8, 9)
- polovodičové tenzometry
  - základní vlastnosti a praktické provedení (str. 10, 11)
- teplotní závislost tenzometrů
  - teplotní působení na měřený objekt a tenzometr (str. 12)
  - princip samokompenzačního tenzometru (str. 14)
- typická zapojení tenzometrů
  - princip zapojení Wheatstonova můstku (str. 15, 16)
  - čtvrtmůstek, zapojení a jeho základní vlastnosti (str. 17)
  - polomůstek, varianty zapojení a použití a jejich základní vlastnosti (str. 18, 19)
  - plný můstek, varianty zapojení a použití a jejich základní vlastnosti (str. 20, 21)
- optické tenzometry
  - princip funkce, praktické provedení, výhody, nevýhody (str. 27, 28)
- bezkontaktní optické metody
  - princip funkce, praktické provedení, výhody, nevýhody (str. 29, 30)

