

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

03 Měření tlaků

Experimentální metody v mechanice tekutin a termodynamice

ZČU: Zkoušení energetických strojů

Prof. Václav Uruba
ÚT AVČR, ZČU Plzeň, ČVUT Praha
<http://home.zcu.cz/~uruba/ZES/>



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Obsah kurzu

- Teorie fyzikálního modelování
- Měření teplot
- **Měření tlaků**
- Měření viskozity tekutin
- Měření rychlosti proudění
- Měření průtoku potrubím
- Měření povrchového tření
- Optické metody
- Základy sběru a zpracování signálů a chyby měření
- Experimentální zařízení v mechanice tekutin



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Obsah přednášky

- Tlaky
 - Statický tlak
 - Celkový tlak
 - Dynamický tlak
- Měření tlaků
- Měření směru proudění
- Manometry



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

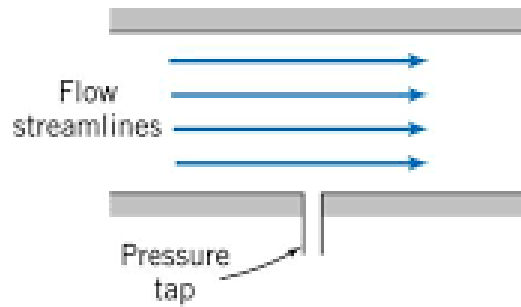
Tlaky

- Bernoulliho rovnice:
 - Statický tlak
 - Dynamický tlak
 - Celkový tlak

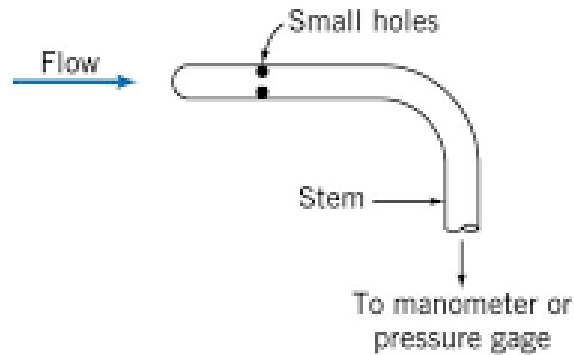
$$p + \frac{1}{2} \rho V^2 = p_0 \quad \left[Pa = \frac{N}{m^2} \right]$$



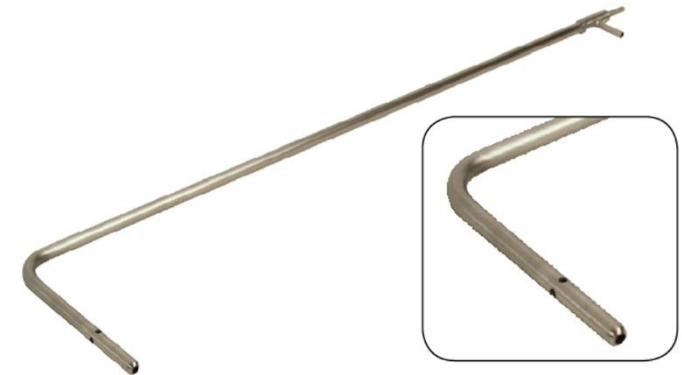
Statický tlak



(a) Wall pressure tap

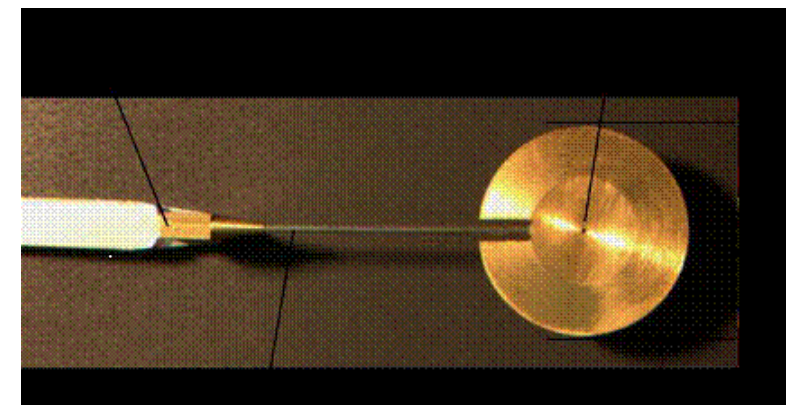


(b) Static pressure probe



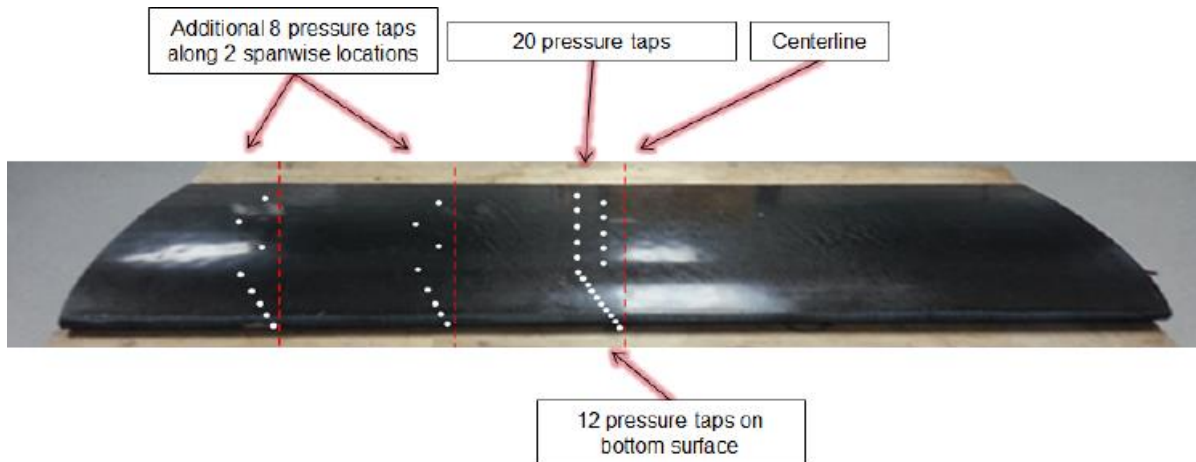
<http://192.237.171.6/products/method-2c-standard-pitot-tube>

Disková sonda



5

Tlakové odběry



https://www.researchgate.net/figure/Layout-of-the-static-pressure-taps_fig1_278242986/download



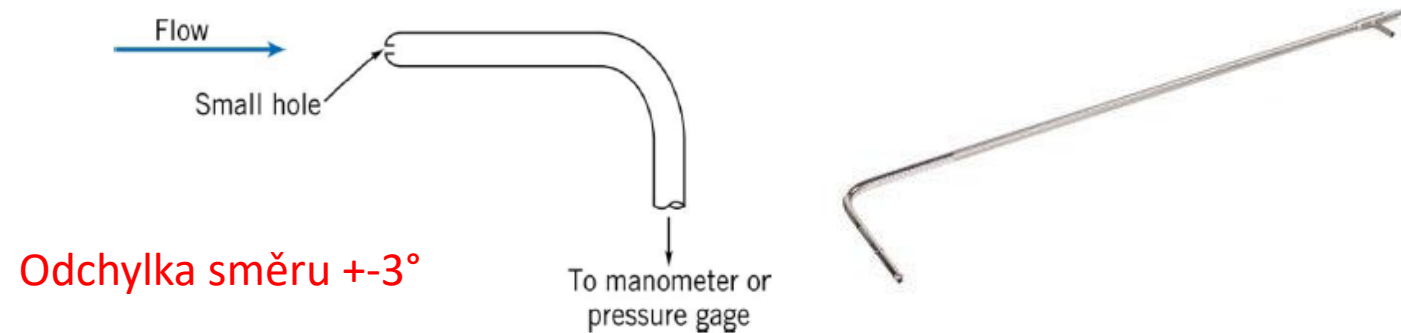
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

http://laurentcordier.net/seminairesLEA/archive_seminaires2010.html

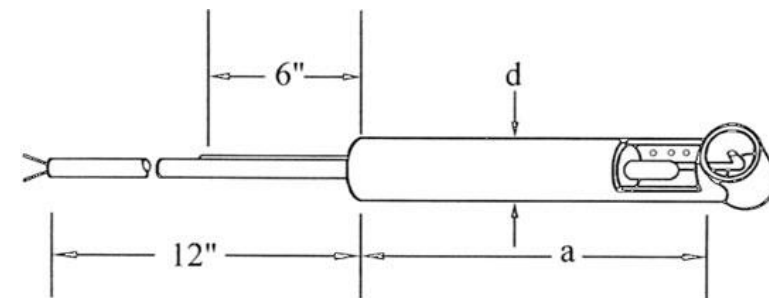
Celkový tlak

Pitotova sonda



<http://192.237.171.6/products/standard-pitots>

Kiel sonda

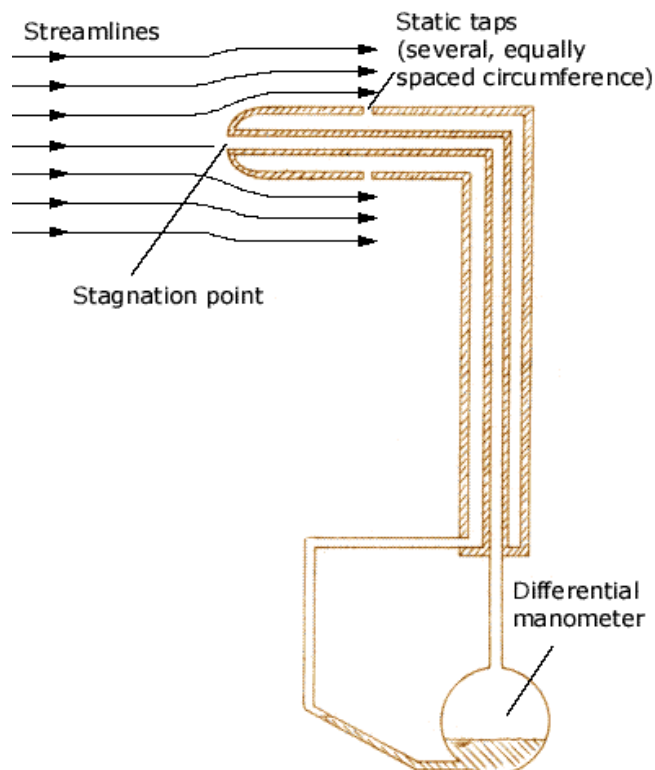


<http://76.12.33.167/kieltemp.html>

Odchylka směru $\pm 10^\circ$

Kombinované sondy

Pitot-static, Prandtl



https://www.efunda.com/designstandards/sensors/pitot_tubes/pitot_tubes_theory.cfm

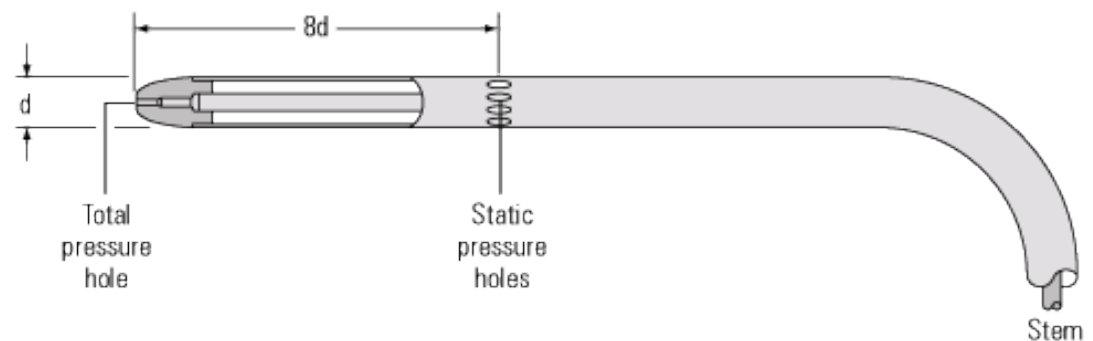
m



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



<https://www.unitedsensorcorp.com/pitot.html>



<https://instrumentationtools.com/pitot-tube-working-principle/>

7

Směrové sondy

- 2D
 - 3 odběry



<http://76.12.33.167/2d.html>

- 3D
 - 5 a více odběrů



Omnidirectional
 Φ 9.5mm
12 odběrů

<http://76.12.33.167/3d.html>

Jednotky tlaku

Pascal [$\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$]

mm H_2O (9.81 Pa)

mm Hg, Torr (133.322 Pa)

bar ($10^6 \text{ dyn}/\text{cm}^2 = 10^5 \text{ Pa}$)

atm ($1.0133 \times 10^5 \text{ Pa}$) – sea level

at ($\text{kgf}/\text{cm}^2 = 0.981 \times 10^5 \text{ Pa}$) – tech. atm.

psi (Pound-force per square inch = 6895 Pa)



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

Manometry

- Typ
 - Differential pressure - PSID
 - Absolute pressure (rel. to ref.) - PSIA
 - Gauge pressure (rel. to atm.) - PSIG
 - Vacuum pressure (negative gauge)
 - Sealed pressure (rel. to atm. at sea level) - PSIS
- Princip
 - Kapalinové
 - Elastické



Kapalinový manometr

$$p = h\rho g$$

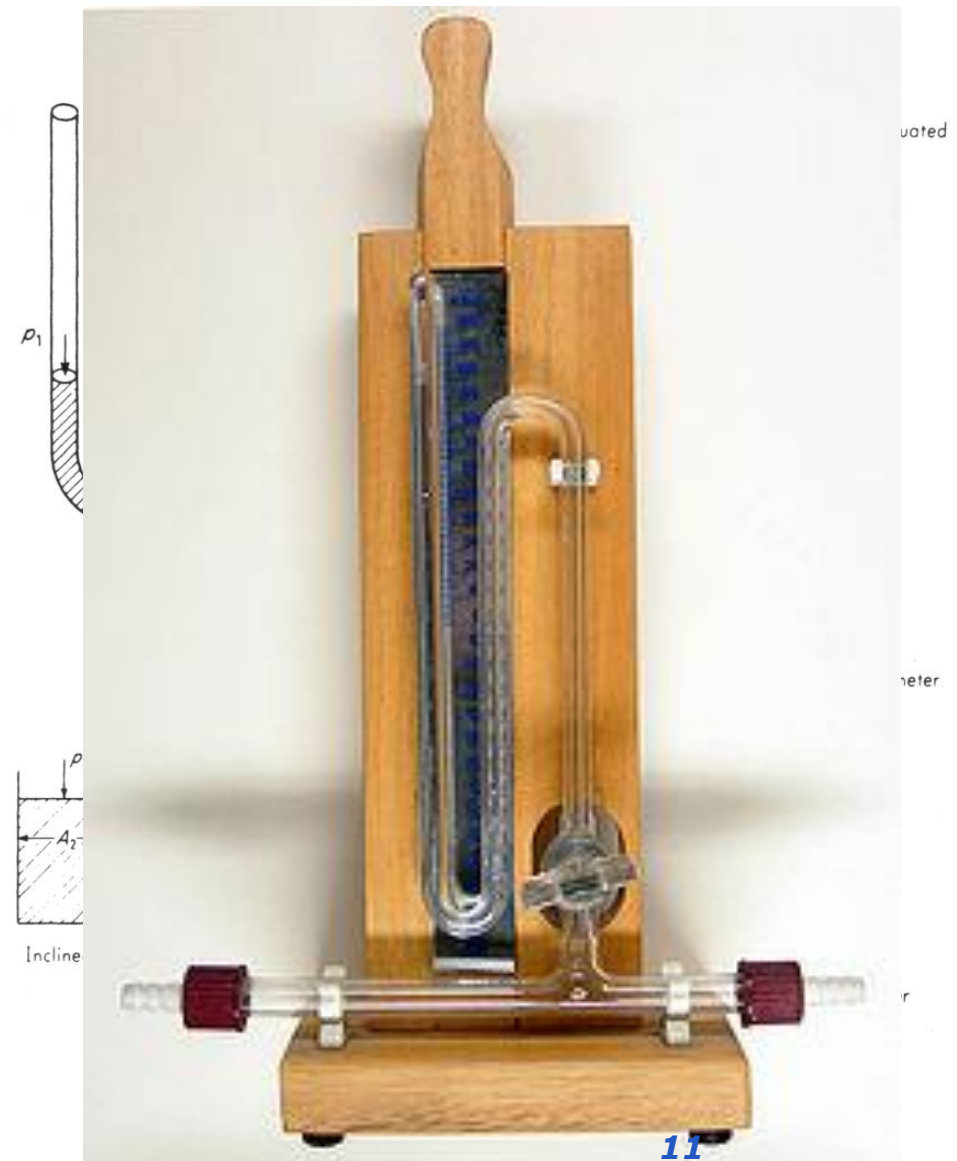
$$p[Pa] = h[mm] \cdot k$$

$$k = \rho \cdot g$$

Voda $k = 9.8$

Alkohol $k = 7.6$

Rtuť $k = 133$



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

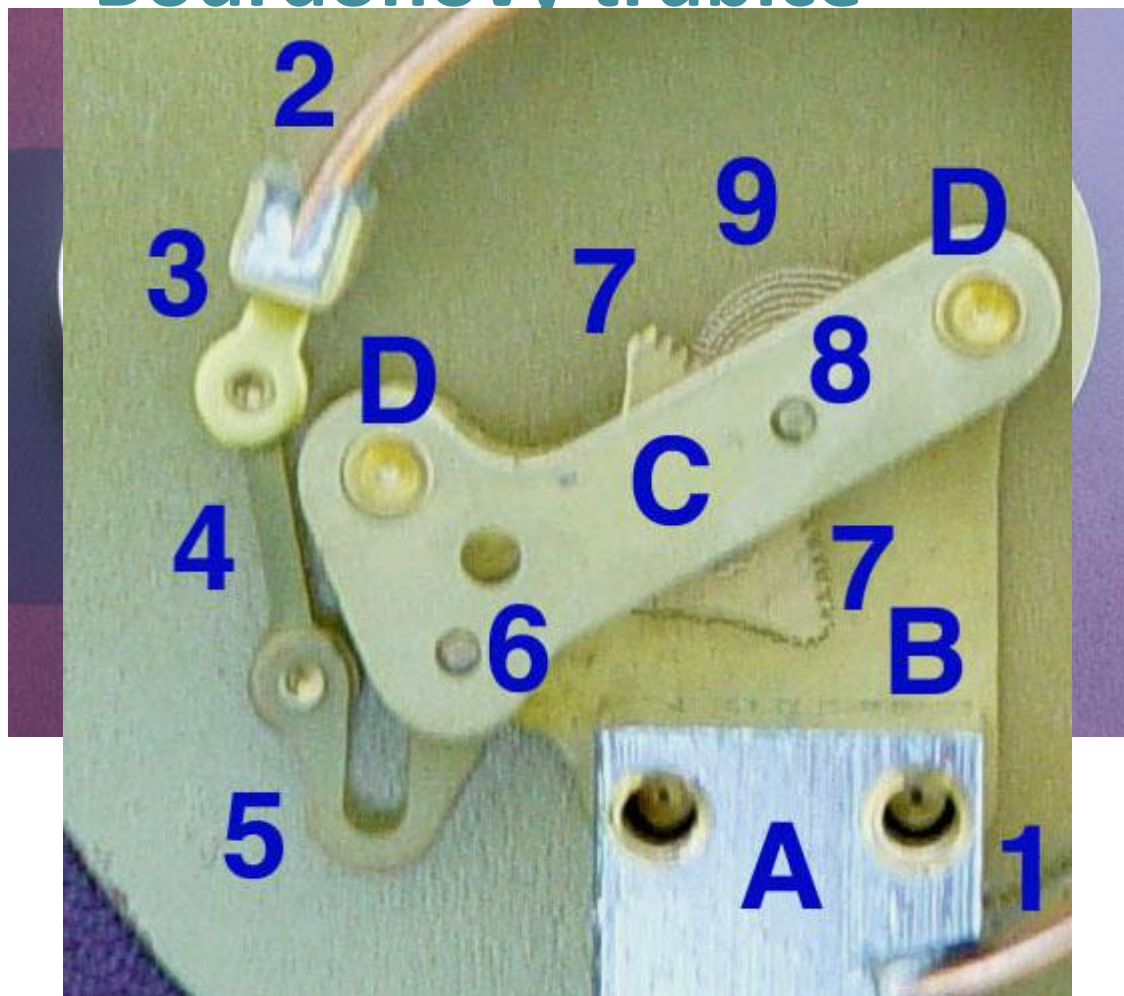
MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Manometry s elastickým senzorem

- Elastický sensor
 - Bourdonovy trubice
 - Vlnovce, kapsle
 - Membrány
- Měření deformace
 - Mechanické
 - Kapacitní
 - Piezorezistivní tenzometry
 - Elektromagnetické
 - Piezoelektrické
 - Optické
 - Potenciometrické
 - ...

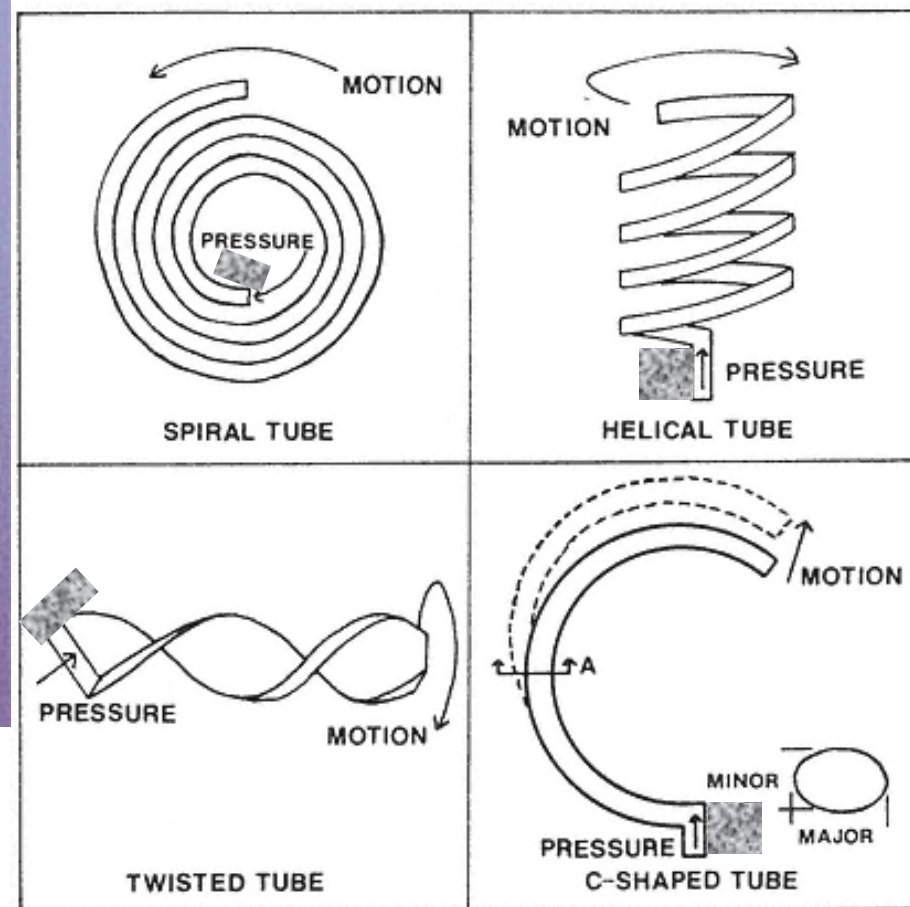


Bourdonovy trubice



Fixace 

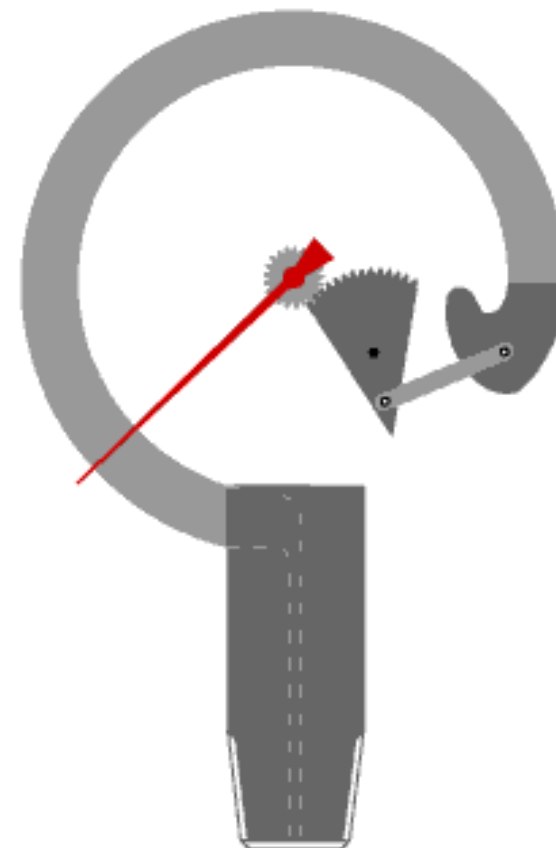
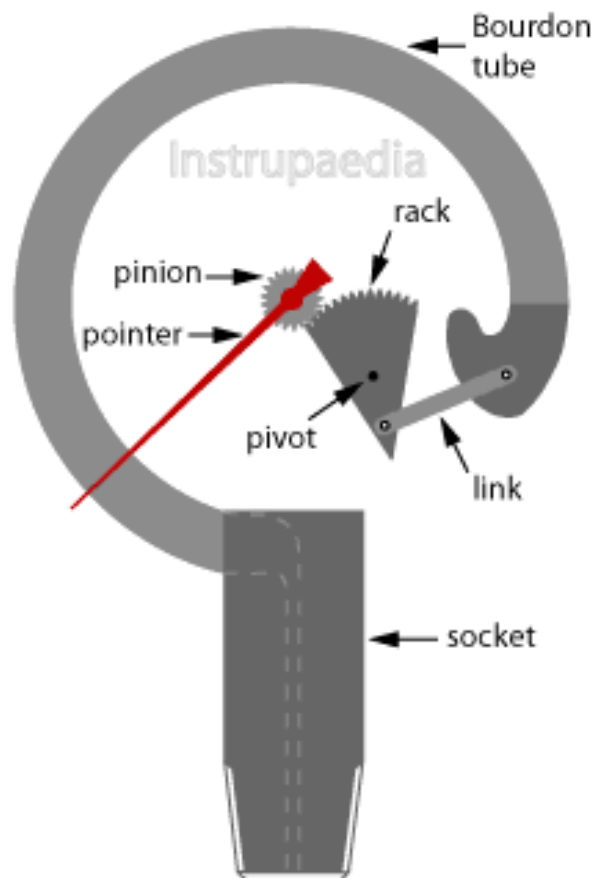
Slepý konec



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Bourdonova trubice



<http://users.telenet.be/instrumentatie/pressure/bourdon-tube-pressure-gauge.html>

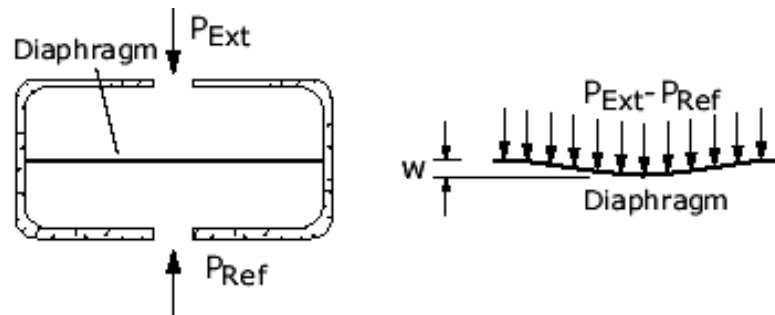


EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

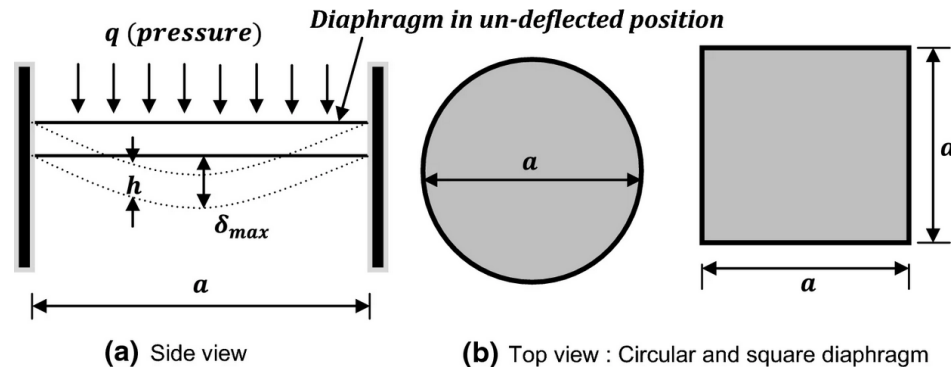
MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Membrány

- Membrána



- Hladká



<https://link.springer.com/article/10.1007/s00542-019-04601-1/figures/2>

- Zvlněná



<https://www.kuze.com/bellows/english/dia-frame.htm>

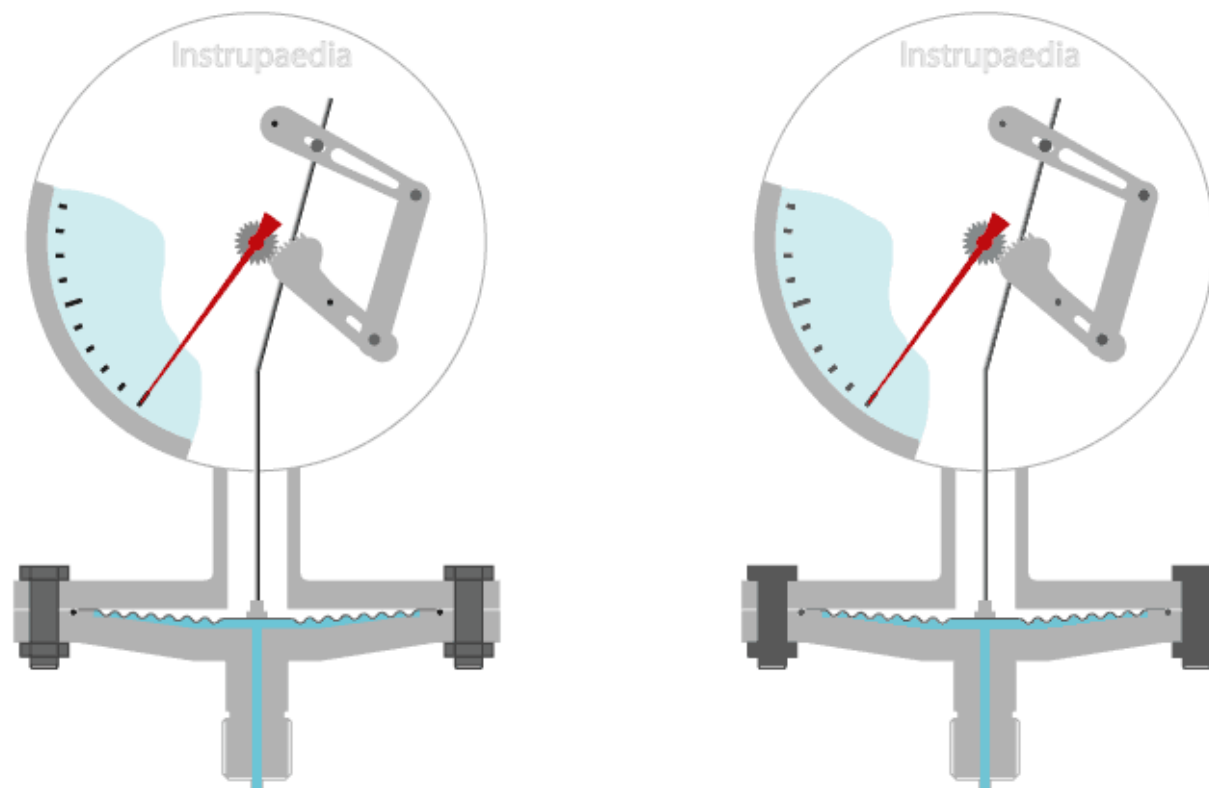


EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Membrána

Mechanické snímání



<http://users.telenet.be/instrumentatie/pressure/diaphragm-pressure-gauge.html>

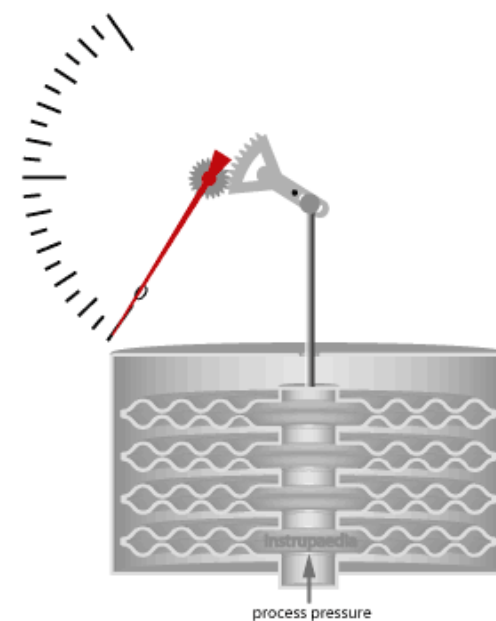
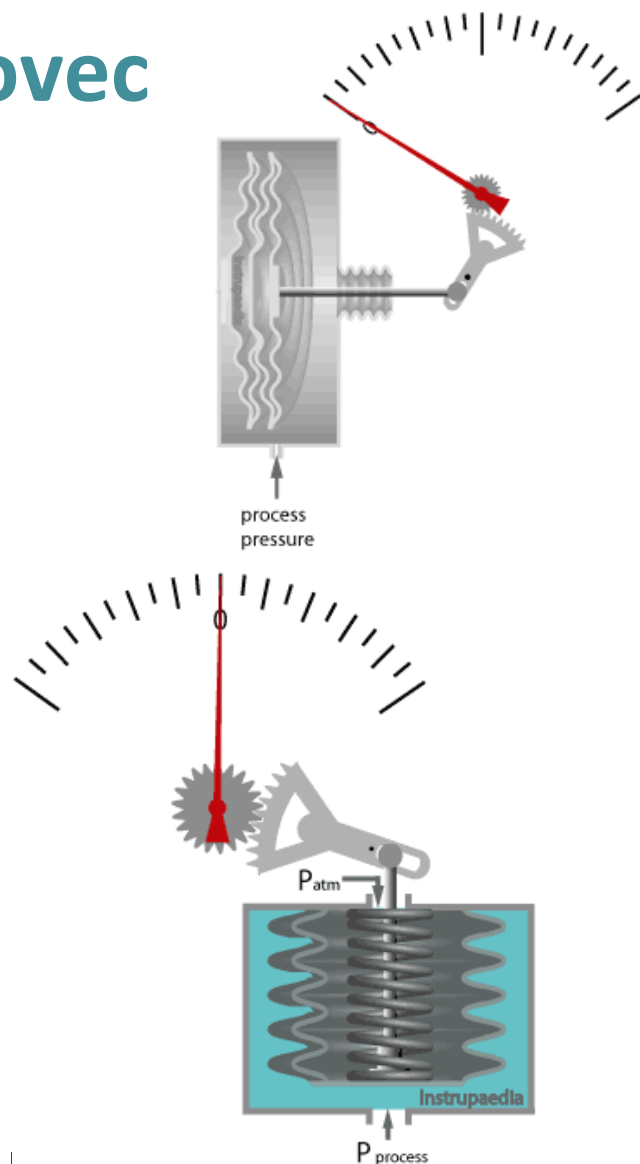


EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Kapsle, vlnovec

- Kapsle
- Vlnovec



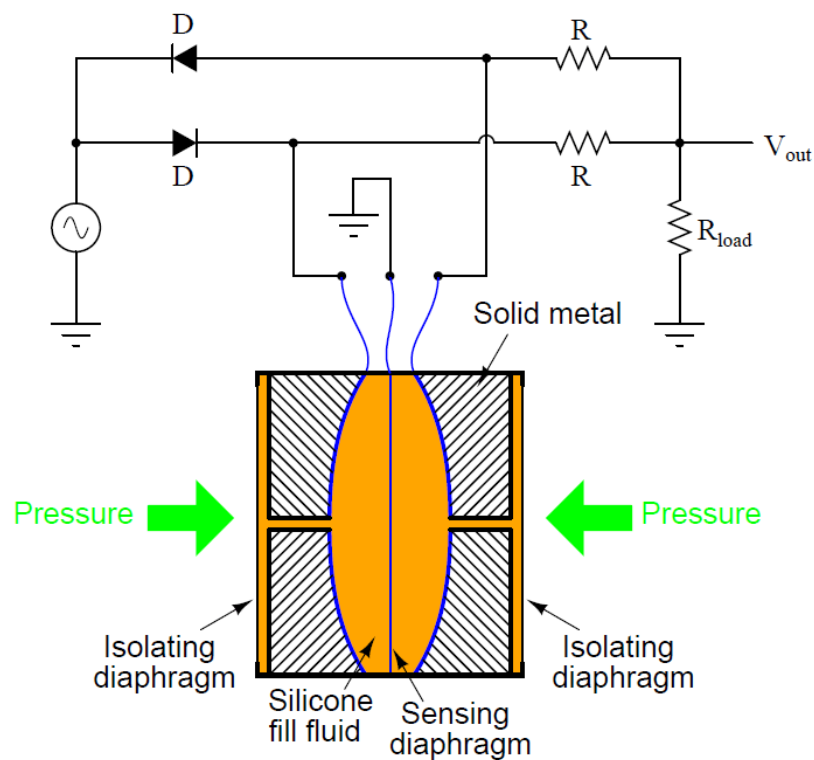
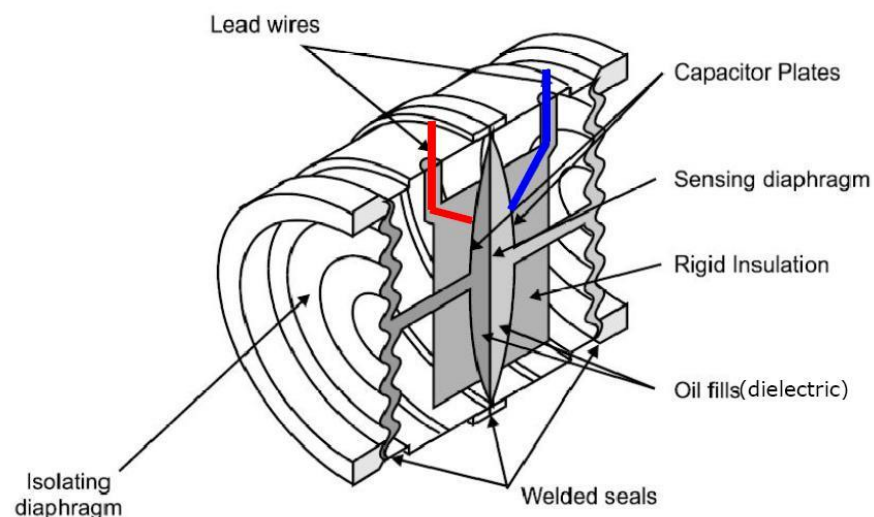
<http://users.telenet.be/instrumentatie/pressure/>



EVROPSKA UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

Membrána

Měření deformace pomocí kapacity (el.)



<https://instrumentationtools.com/differential-capacitance-pressure-sensor-circuit/>

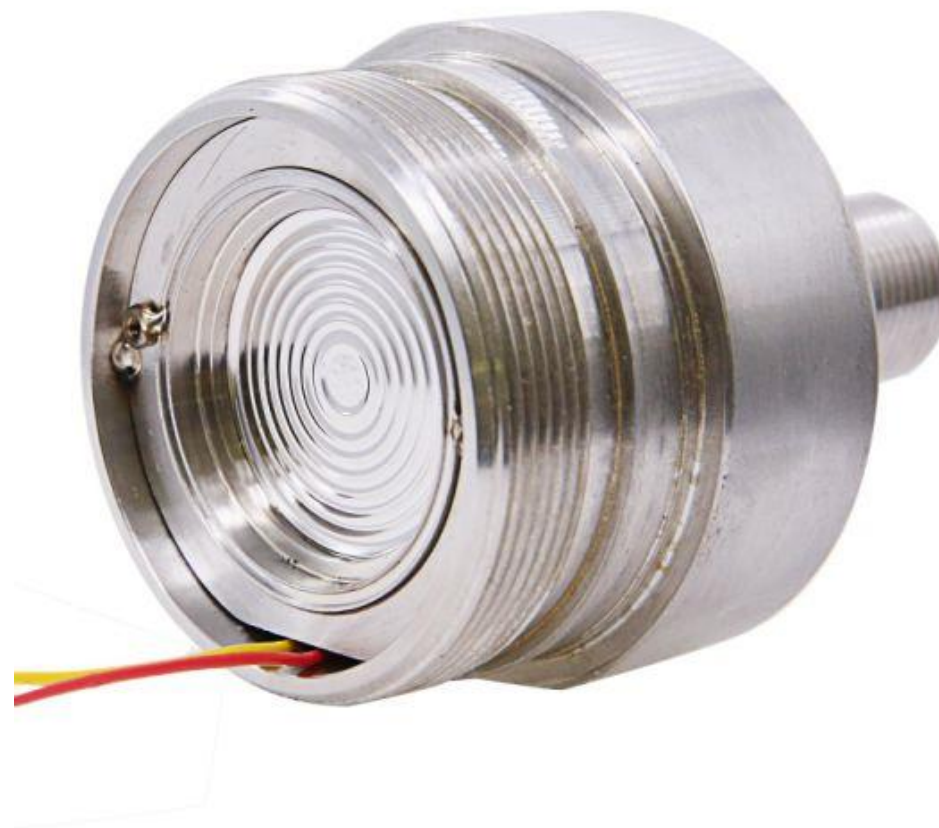


EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

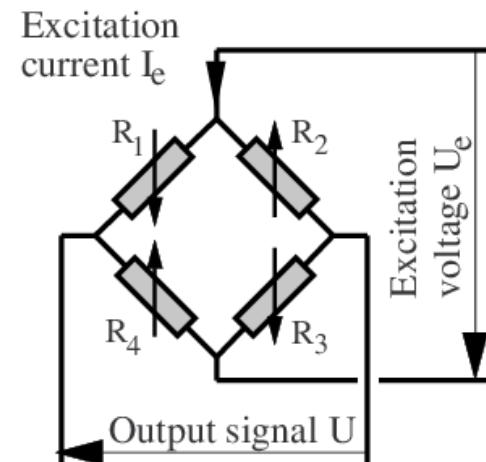
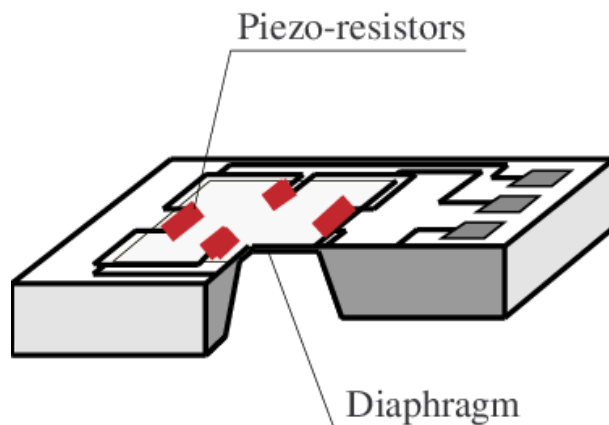
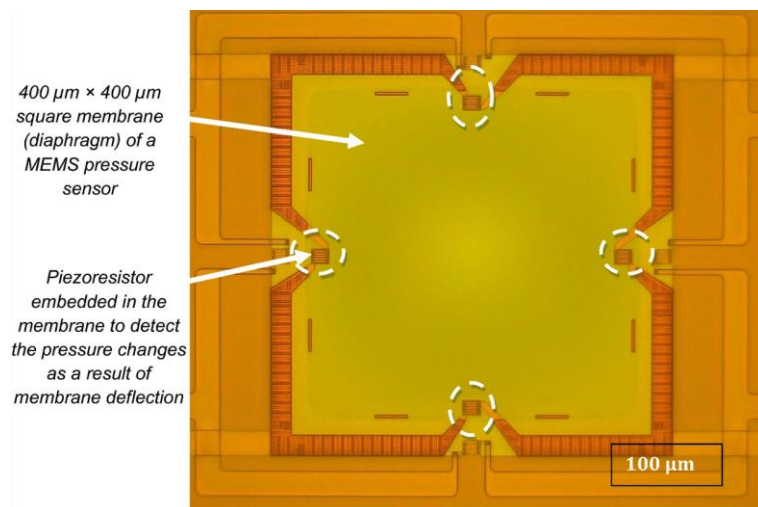
Kapacitní snímače

- Robustní
- Lineární
- Vysoká přesnost
- Stabilita
- Rozměrné
- Nízká frekvence



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

Piezorezistivní membrány



https://www.researchgate.net/figure/Miniature-piezoresistive-pressure-sensor-chip-Wheatstone-bridge-circuit_fig2_305850597

<https://www.pmc1.com/products/sts-oem-piezoresistive-pressure-transducer-td/>



20



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Piezorezistivní membrány

- Vysoká citlivost
- Vysoké frekvence
- Malé
- Teplotní závislost
- Nelineární
- Křehké



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

Tlakový skener

- Piezorezistivní
- až 64 snímačů
- Elektronika, procesor



22

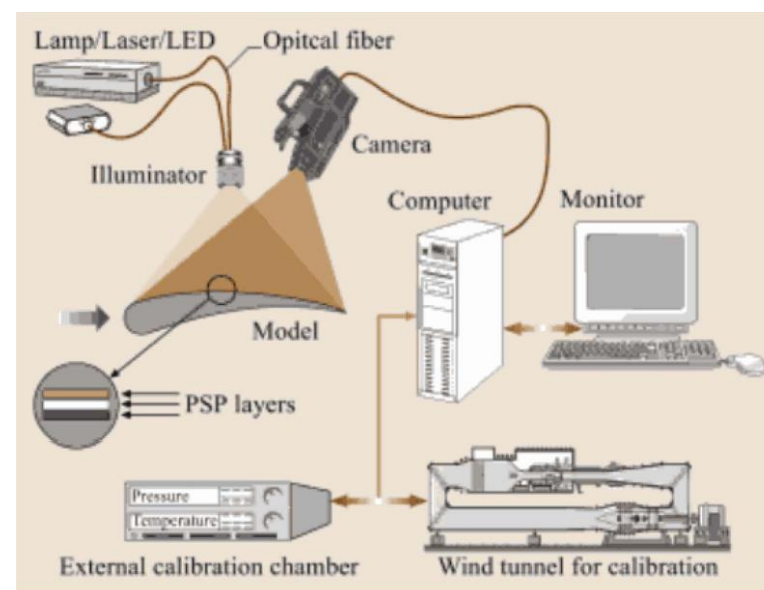


EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Nátěry citlivé na tlak

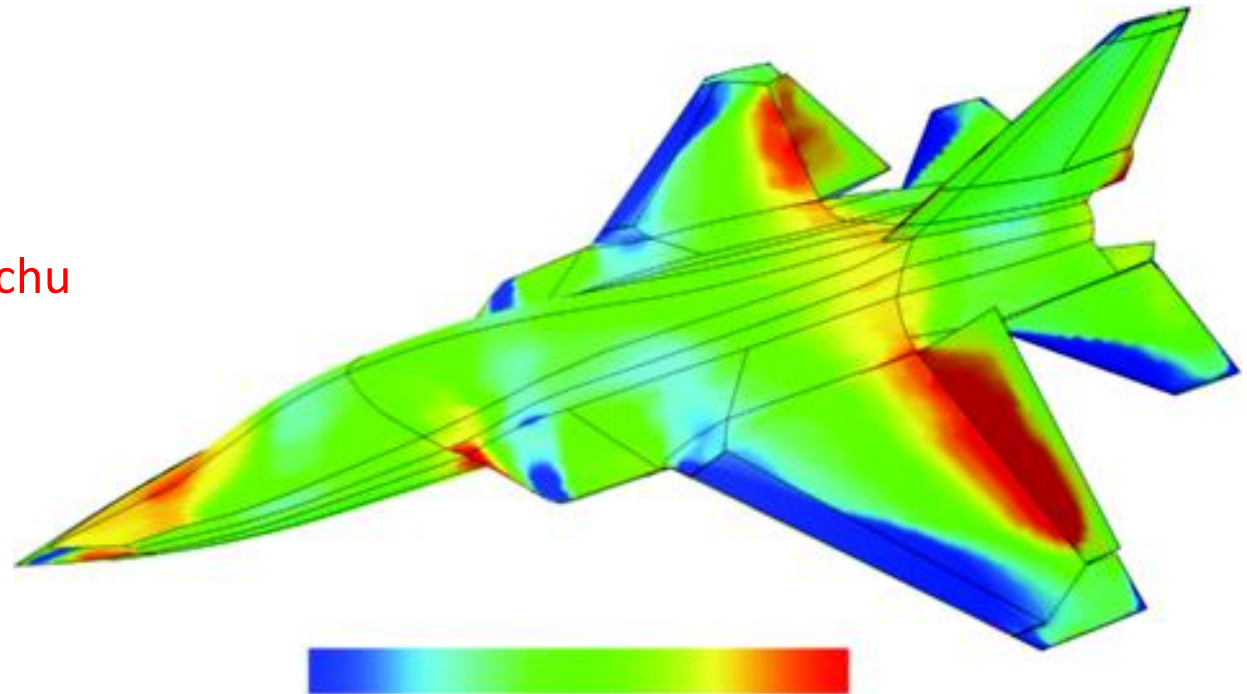
- Na povrchu, statický tlak
- Deaktivace organických luminoforů vybuzených světlem vlivem O_2 (quenching).
- Indikuje parciální tlak O_2 .
- H. Kautsky a H. Hirsch v 1935.



Nátěry citlivé na tlak

- Kvalitativní
- Vysoké tlaky a rychlosti

Rozložení tlaků na povrchu



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Otázky pro studenty

- Jaké znáte tlaky?
- Jakými sondami měříme tlaky?
- Uvedte typy manometrů.
- Jaké jsou další možnosti indikace tlaků?



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání


MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY