

Měření tlaku

Základní pojmy

Tlak: síla F působící kolmo na jednotku plochy S

$$p = \frac{F}{S} = \frac{m \cdot g}{S} \quad (\text{Pa; kg, m} \cdot \text{s}^{-2}, \text{m}^2)$$

Hydrostatický tlak: tlak sloupce kapaliny o výšce h a hustotě ρ

$$p = \rho \cdot g \cdot h \quad (\text{Pa; kg} \cdot \text{mm})$$

Absolutní tlak: měří se od absolutní nuly

Vakuum: velký podtlak, když se absolutní tlak blíží nule

Přetlak a podtlak: měří se od okamžitého barometrického (atmosférického) tlaku p_b

Celkový tlak: součet statického tlaku p_s a dynamického tlaku p_d

$$p_c = p_s + p_d$$

Statický tlak: stejný v celém průtočném průřezu

Dynamický tlak: závisí na rychlosti proudění a hustotě

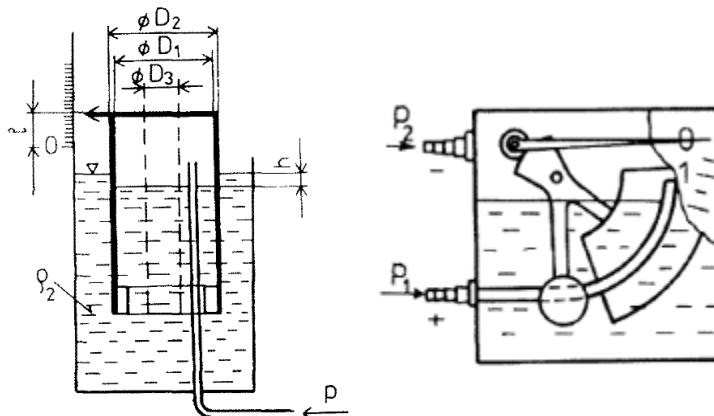
$$p_k = \rho \cdot w^2 / 2$$

Rozdělení tlakoměrů

- 1) hydrostatické
 - a. zvonové a pístové: měřítkem tlaku je zdvih zvonu (zvonové) nebo hmotnost závaží na pístu známého průřezu (pístové)
 - b. kapalinové: měřítkem tlaku je výška kapalinového sloupce
- 2) deformační: deformace pružného prvku
- 3) elektrické: změna elektrické veličiny

Zvonové tlakoměry

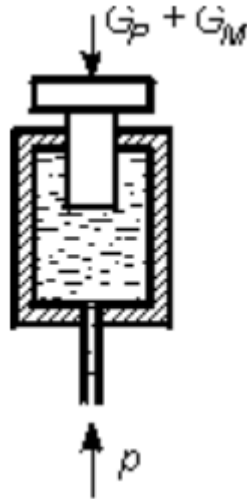
Princip: zvon ponořený do kapaliny (vody, petrolejem toluenu, oleje), zdvih zvonu l je měřítkem tlaku



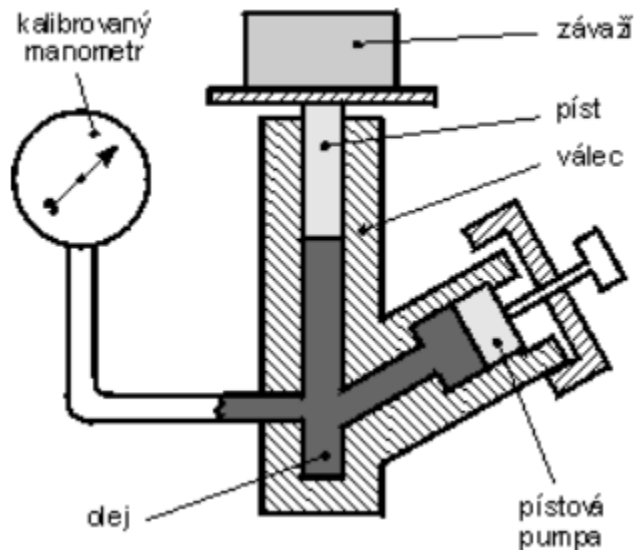
Použití: statické tlaky do 500 Pa, kalibrace jiných tlakoměrů

Pístové tlakoměry

Princip: tíha pístu G_p a tíha závaží G_m vytváří statický tlak v kapalině



Využití: kalibrace deformačních tlakoměrů, vysoké tlaky – až GPa



Kalibrační zařízení obsahuje pístový tlakoměr, čerpadlo (pístovou pumpu), ventily a zásobník oleje.

Postup kalibrace:

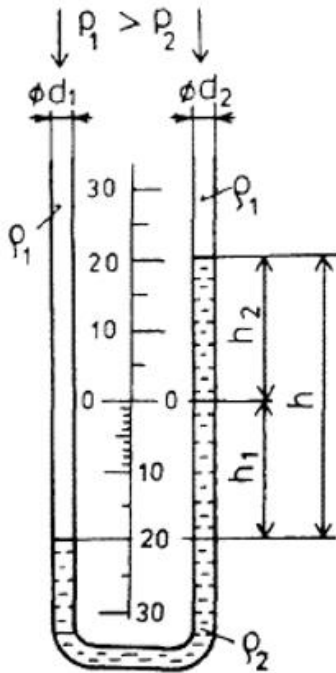
- 1) Zašroubování ověřovaného tlakoměru do objímky.
- 2) Otevření ventilu pro zásobník oleje a nasátí čerpadlem do systému.
- 3) Zavření ventilu pod zásobníkem, otevření ventilu pod zkoušeným tlakoměrem.
- 4) Umístění závaží odpovídajícího požadovanému tlaku na talíř pístu.
- 5) Vytlačování oleje do válce tlakoměru čerpadlem, až se píst zvedne do požadované výše.
- 6) Roztočení pístu (zaručení kapalinového tření) a odečtení údaje z manometru.
- 7) Přidání závaží, poklesnutí pístu a opakování od bodu 5.
- 8) Konstrukce grafu odchylek nebo korekcí.

Kapalinové tlakoměry

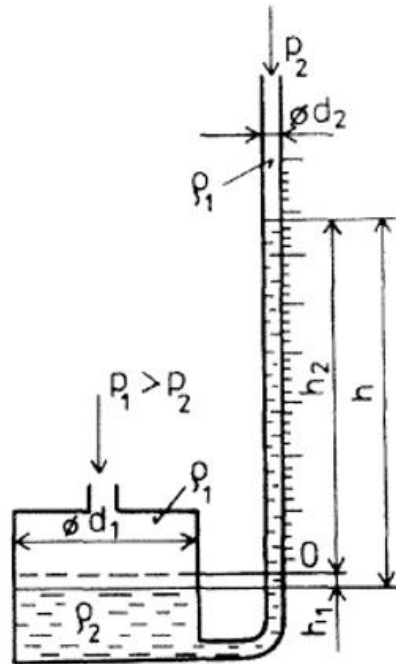
Princip: odečítání výšky kapalinového sloupce v trubicích nebo nádobách; rozsah tlaku a přesnost měření závisí na tlakoměrovém médiu (destilovaná voda, rtuť, líh) a přesnosti čtení výšky sloupce. Odečtené hodnoty jsou ovlivněny okamžitou hustotou (měrným objemem) kapaliny.

Rozdělení:

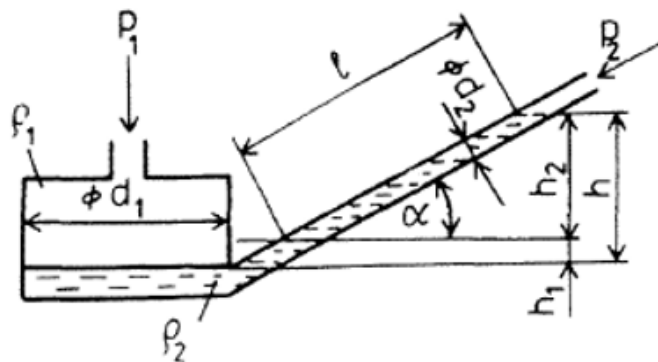
- a) **U-trubicové tlakoměry:** skleněná (plastová) trubice tvarovaná do tvaru písmene U, nebo dvě přímé trubice spojené např. pružným elementem (gumová hadice apod.) zcela naplněná kapalinou. Tlakový rozdíl $\Delta p = p_1 - p_2$ vychýlí kapalinu o míru h . Je nutné odečítat výchylku sloupce v obou ramenech.



- b) **nádobkové tlakoměry:** výchylka se odečítá pouze v trubici (h). Pokles hladiny v nádobce musí být kompenzován ve stupnici tlakoměru.



VARIANTOU NÁDOBKOVÉHO TLAKOMĚRU JE **MIKROMANOMETR SE SKLOPNOU TRUBICÍ**. SKLÁPĚNÍM TRUBICE SE STUPNICÍ SE ZVYŠUJE CITLIVOST TLAKOMĚRU.



Deformační tlakoměry

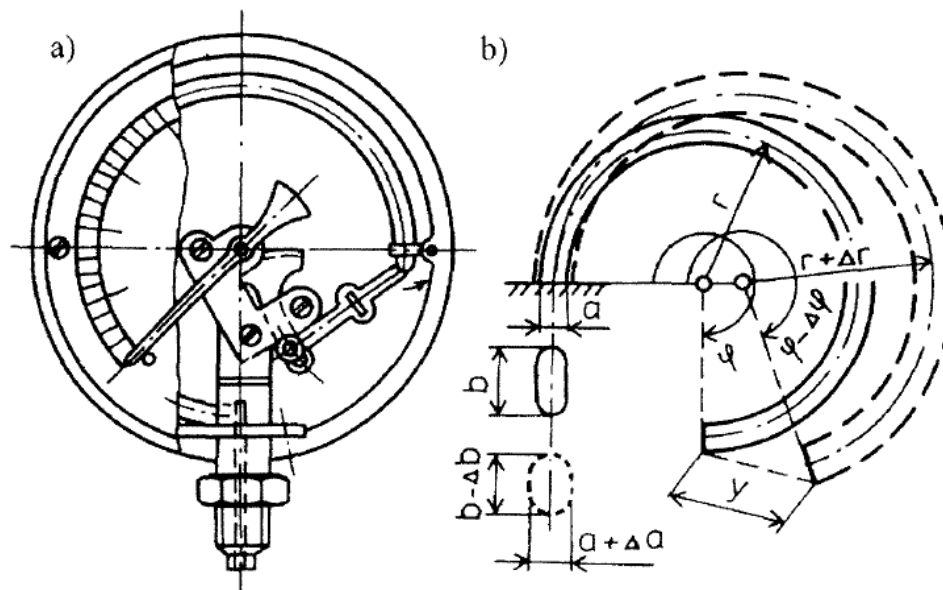
Princip: pružná deformace a změna geometrie tlakoměrného prvku při působení tlaku

Výhody: robustnost provedení, malé rozměry a hmotnost, velký měřicí rozsah, dostatečná přesnost, jednoduchost a spolehlivost, jednoduchá obsluha a údržba

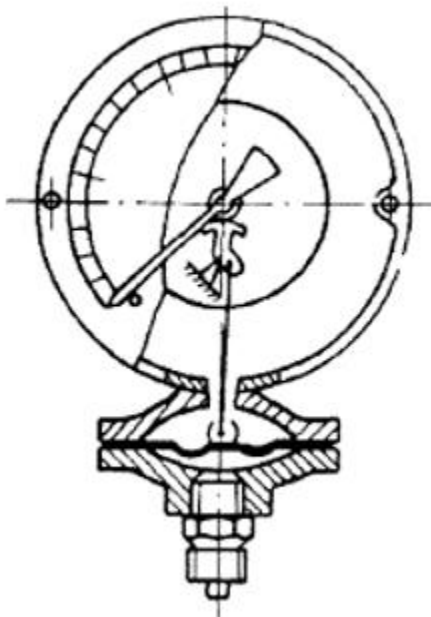
Nevýhody: trvalé deformace měřicího prvku během provozu, malá deformace měřicího prvku (nutnost např. zařadit mechanický převod), ovlivnění pružnosti teplotou, nutnost kalibrace a ověřování

Rozdělení:

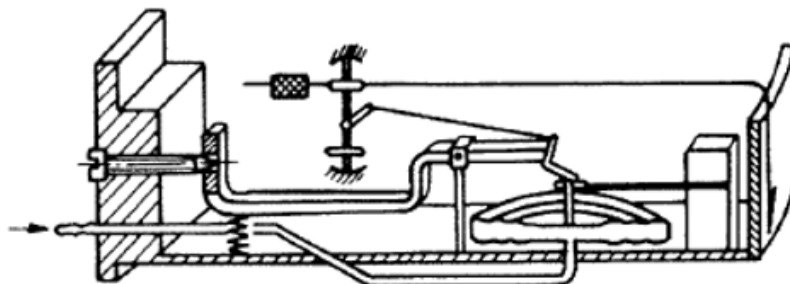
- a) **trubicové (Bourdonské):** k měření podtlaků, vakua a přetlaků. Zploštělá, na jednom konci uzavřená svinutá pružná trubice je vlivem přiváděného tlaku „narovnávána“, což vychyluje závislou ručičku tlakoměru.



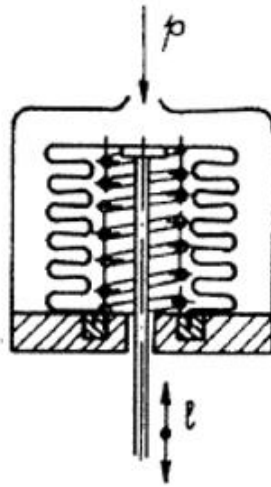
- b) **membránové:** pružná membrána kruhového tvaru se přiváděným tlakem vybočí. Toto nadzvednutí je mechanicky převedeno na ručičku tlakoměru.



- c) **krabicové:** plochá krabice obvykle kruhového tvaru, jejíž dna jsou tvořena membránami; deformace krabice je mechanicky převáděna na ukazatel tlaku. Použití pro velmi malé tlaky.



- d) **vlnovcové:** kovový měch (vlnovec) umístěný v měřicí komoře. Měřený tlak působí vně vlnovce. Uvnitř vlnovce je umístěna pružina. Tlak určuje zdvih l . Použití v oblasti regulační techniky (spínání či rozepínání ovládacích kontaktů).



Elektrické tlakoměry

Využívá se závislosti některých elektrických veličin.

Rozdělení:

- a) **elektrické vakuometry:** využívají buď principu ionizace mezi elektrodami v komoře se zbytkovým vzduchem (závislost proudu na tlaku – ionizační vakuometr) nebo tlakové závislosti tepelné vodivosti plynu (bolometrický vakuometr)
- b) **odporové tlakoměry:** využívají tlakové závislosti odporu – pouze při vysokých tlacích (80 MPa až 3 GPa). Stlačování průřezu drátu a následná změna jeho elektrického odporu.

Měření rychlosti proudění

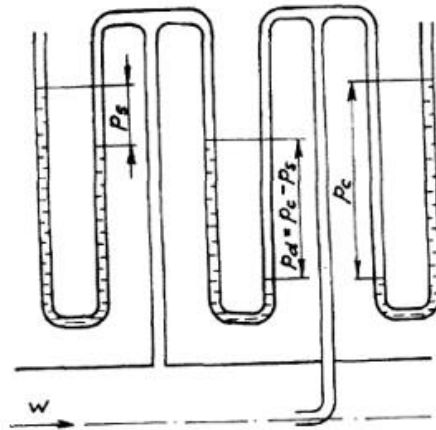
Rychlostní sondy

Používají se pro laboratorní účely nebo pro přesná zpravidla jednorázová měření. Rychlost proudění je dána vztahem

$$w = \sqrt{2 \cdot \frac{p_d}{\rho}} = \sqrt{2 \cdot \frac{q \cdot s}{\rho}}$$

Pitotova trubice

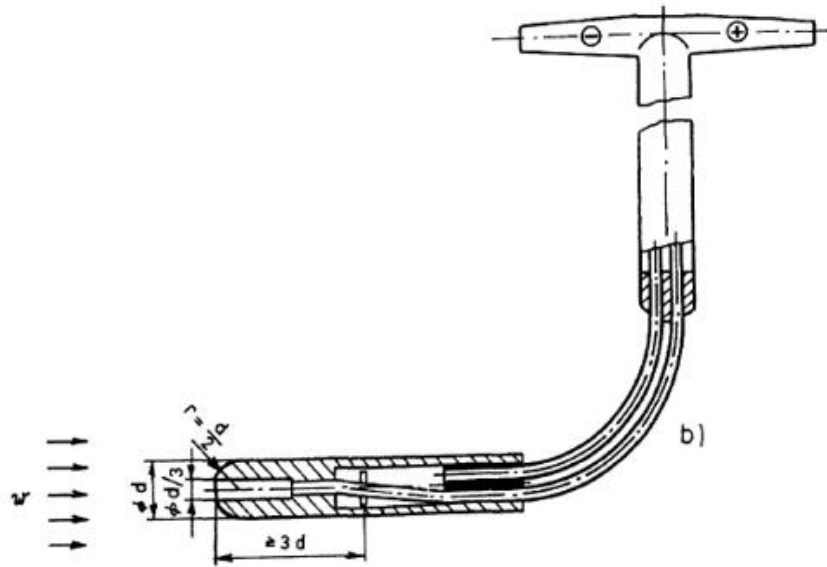
Využívá vztahu pro dynamický tlak proudící tekutiny v uzavřeném kanále: $p_d = p_c - p_s$.



Odběrová místa celkového tlaku (osové napojení) a statického tlaku (tupé napojení). Přesnost je ovlivněna tím, že se celkový a statický tlak neměří v jednom místě.

Prandtlova trubice

Jinak též zvaná Pitotova statická trubice měří oba tlaky p_c i p_s v jednom místě. Jedná se o tubici ohnutou do pravého úhlu. Na čele trubice je otvor pro odečet celkového tlaku a po stranách trubice jsou otvory pro odečet statického tlaku. Spodní mez měřené rychlosti je dána měřitelností dynamického tlaku (cca 6m/s voda a 0,2 m/s vzduch), nejvyšší měřitelná rychlost je omezena prakticky jen tuhostí sondy.

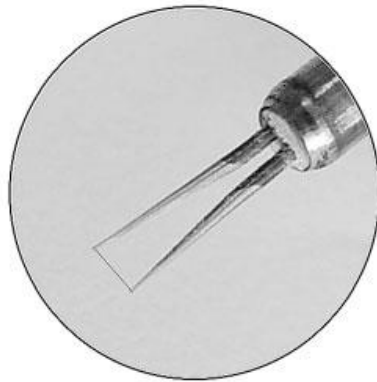


Termoanemometrie

Kontaktní metoda pro měření rychlosti a teploty v tekutinách vhodná pro měření turbulentních veličin a fluktuací rychlosti nebo teploty.

Princip: konvektivní přenos tepla z odporově zahříváného tělesa—čidla (sondy)

- sondou je slabý obvykle wolframový drátek napnutý mezi hroty vidličky



- Jouleovo teplo produkované drátkem sondy o průřezu S_w s měrným elektrickým odporem ρ_w , kterým prochází elektrický proud I : **Jouleův zákon**

$$d\dot{Q}_J = \frac{I^2 \rho_{\text{wire}}}{S_{\text{wire}}} dx$$

- vzniklé teplo se částečně akumuluje v materiálu sondy a zbytek je odveden do okolní tekutiny konvekcí, kondukcí a radiací:

$$d\dot{Q}_J = d\dot{Q}_{\text{ac}} + d\dot{Q}_{\text{conv}} + d\dot{Q}_{\text{cond}} + d\dot{Q}_{\text{rad}}$$

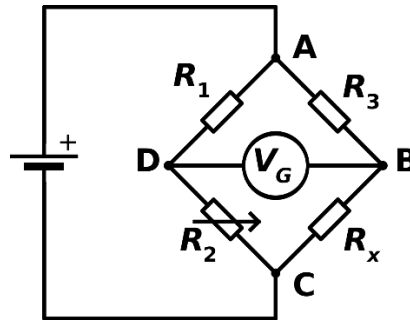
- člen akumulace lze obvykle zanedbat z důvodu nízké tepelné kapacity materiálu sondy
- člen vedení lze zanedbat z důvodu rozměrů drátku; průměr je daleko menší než délka drátku (mikrometry vs. milimetry)

- člen radiace je významný pouze při nízkých rychlostech proudění nebo při nízkém tlaku
- zbývá konvektivní člen, který je dán **Newtonovým ochlazovacím zákonem**

$$d\dot{Q}_J = d\dot{Q}_{\text{conv}} = \pi d_w \alpha (T_w - T_\infty) dx,$$

d_w je průměr drátku, T_w je jeho teplota, T_∞ teplota okolí a α je součinitel přestupu tepla

Proud v obvodu termoanemometru je regulován pomocí **Wheatstoneova můstku** (elektronická regulační součástka složená ze dvou větví, rezistorů a potenciometru).



Módy:

- CTA (Constant Temperature Anemometry):** sonda je udržována na konstantní teplotě, tzn. elektrický odpor drátku se nemění.
 - se změnou rychlosti dochází ke změně teploty, to je kompenzováno dodatečnou změnou napětí
 - dodané napětí je mírou rychlosti proudění
 - používá se pro přesné měření fluktuací rychlosti
- CCA (Constant Current Anemometry):** na sondě je udržován konstantní proud.
 - se změnou teploty se mění odpor vlákna, to změni napětí na svorkách
 - napětí nemá kompenzační funkci, ale je přímo mírou teploty proudění
 - používá se pro přesné měření fluktuací teploty

Součinitel přehřátí sondy:

- důležité měřítko pro nastavení teploty drátku
- rychlostní nebo teplotní citlivost je přímo závislá na volbě součinitele přehřátí
- závisí na vlastnostech drátku a proudícího média
- snahou je volit součinitel co nejvyšší, ale limitem je např. teplota varu u kapalin nebo teplota tavení drátku
- součinitel přehřátí je určen provozním odporem drátku a odporem drátku při teplotě okolí

$$a = \frac{R_w - R_0}{R_0}$$

Kalibrace rychlosti (teploty)

Pro získání kvalitních výsledků je nutná přesná kalibrace sondy. Měřená veličina je napětí, proto je nutné určit vztah pro přepočet rychlosti $E = f(U)$ (CTA), respektive teploty $E = f(T)$ (CCA). Nejčastěji používané vztahy kalibračních křivek jsou:

- Kingův zákon:

$$E^2 = A + BU^n$$

- n je exponent Kingova zákona stanovený Kingem na hodnotu $n = 0,5$ a později zpřesněn na hodnotu $n = 0,4 \div 0,45$

- rozšířený Kingův zákon:

$$E^2 = A + BU^{0,5} + CU$$

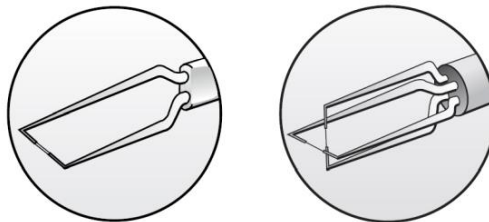
- proložení polynomickou křivkou:

$$U = A + BE + CE^2 + DE^3 + \dots$$

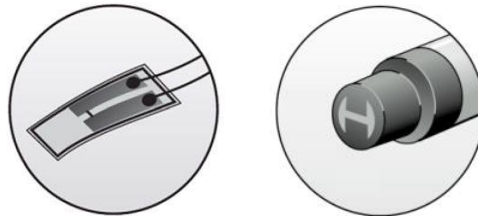
Pro kalibraci rychlosti se používá speciální kalibrační zařízení, které přesně nastavuje rychlost proudění tryskou kalibrátoru. Pro kalibraci teploty se používá např. kalibrační pícka/lázeň nebo klimakomora. Během kalibrace se naměří dostatečné množství diskretních hodnot rychlosti nebo teploty, obvykle 10 nebo více v rozsahu rychlostí nebo teplot předpokládaných během experimentu. Diskretní hodnoty jsou následně proloženy vhodnou kalibrační křivkou.

Termoanemometrické sondy:

- a) drátkové sondy (jednodrátkové pro jednoosé proudění nebo vícedrátkové pro víceosé proudění): **HWA** (Hot Wire Anemometry)



- b) filmové sondy (sondy určené pro přesné měření fluktuací veličin u stěn, lze využít například i pro stanovení součinitele přestupu tepla): **HFA** (Hot Film Anemometry)



Výhody:

- snadnost použití
- velký rozsah měřených hodnot
- malá velikost sondy (průměr 5 μm , délka 1,25 mm)
- 1, 2 nebo 3 složky rychlosti (1D, 2D, 3D měření rychlosti)

- měření teploty
- přesné výsledky, vysoká citlivost, vysoký poměr signálu a šumu
- analogový signál, který je možné převádět na diskrétní signál o vysoké frekvenci (tisíce Hz)

Nevýhody:

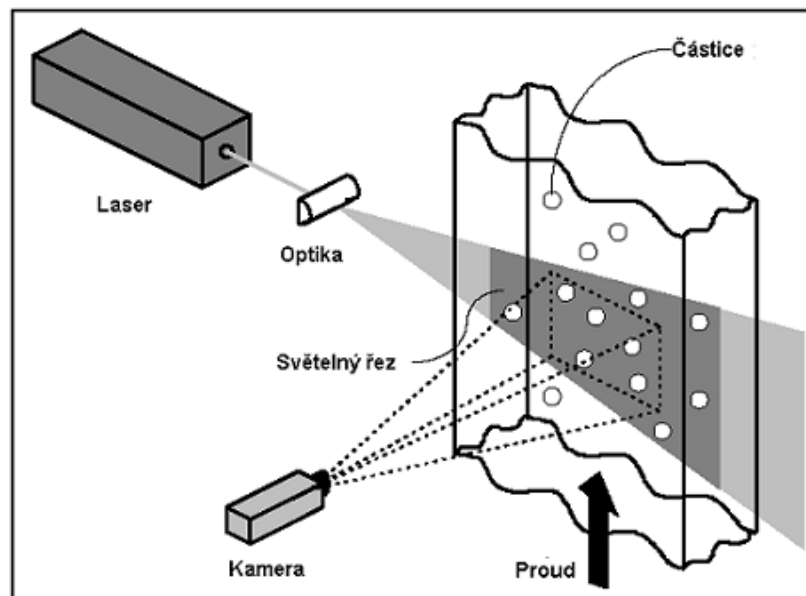
- kontaktní metoda (ovlivňování proudění)
- nutná přesná kalibrace
- obtíže při určení směru proudění
- náchylnost sondy k poškození např. nečistotami v proudění nebo manipulací

Particle Image Velocimetry

Používá se pro vizualizaci a měření proudových polí. Jedná se o bezkontaktní optickou metodu založenou na principu sledování posunutí stopovacích částic rozptýlených v proudící tekutině. Elementární rovnicí je rovnice rychlosti určené z posunutí částice Δl za čas Δt :

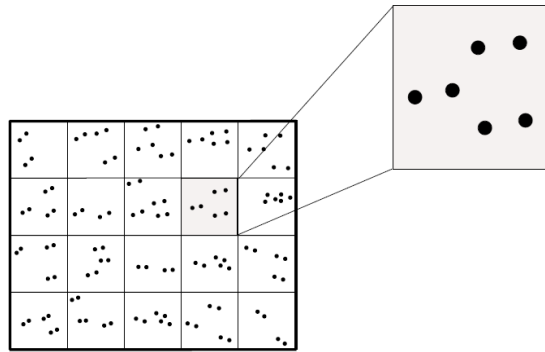
$$v = \frac{\Delta l}{\Delta t}$$

Sledovaný proud je osvětlen rovinou laserového světla (laserový řez) a světlo rozptýlené stopovacími částicemi je zaznamenáno na kameru. Čas Δt je určen frekvencí pulzního laseru, vzdálenost Δl posunutím částic v obrazové rovině. Záznam je nutný přepočítat do roviny objektu (roviny řezu) pomocí prostorové kalibrace.

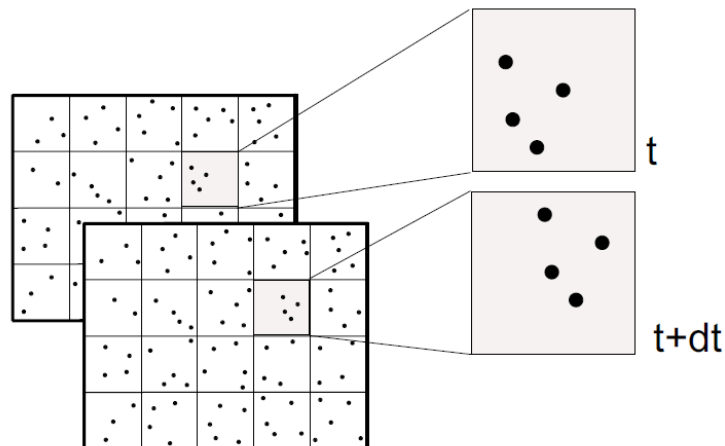


Režimy záznamu:

- dvojnásobná expozice (jeden snímek):** záznam počátečního i konečného stavu rozložení částic je proveden na jeden snímek



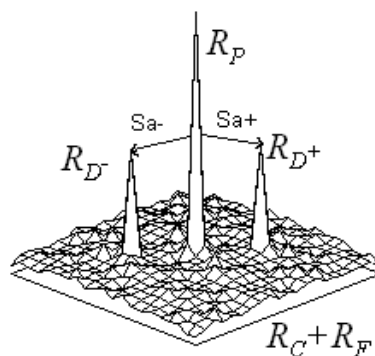
b) **jednotlivé expozice (dva snímky):** první i druhá expozice je zaznamenána zvlášť



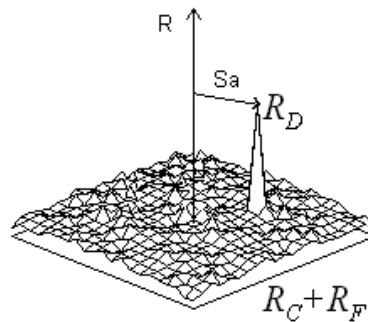
Analýza PIV obrazů:

PIV obraz je rozdělen na síť malých tzv. vyhodnocovaných oblastí (nejčastěji 64×64 , 32×32 nebo 16×16 pixelů). Ve čtvercích je samostatně hledán vektor posunutí pomocí algoritmů hledajících korelaci v posunutí obrazového vzoru částic. Podle způsobu záznamu obrazu se rozlišuje **autokorelace** (dvojnásobná expozice) a **vzájemná korelace** (jednotlivé expozice). Vytváří se tzv. korelační mapa: 3D vyobrazení pravděpodobnosti posunutí částic ve vyhodnocovaném čtverci. Korelační mapa je prováděna s využitím rychlé Fourierovy transformace (FFT).

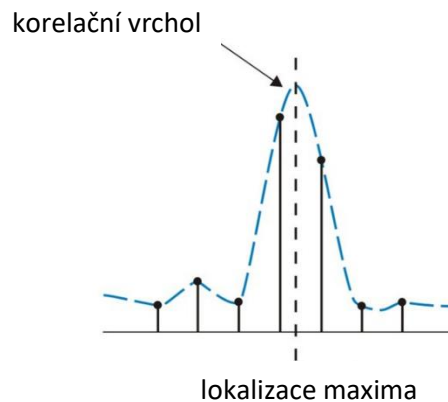
- a) **Autokorelace** vytváří jeden centrální vrchol v korelační rovině a dva středově souměrné vrcholy definující „průměrné“ posunutí s_a v každé vyhodnocované oblasti. Směr vektoru rychlosti je nejednoznačný.



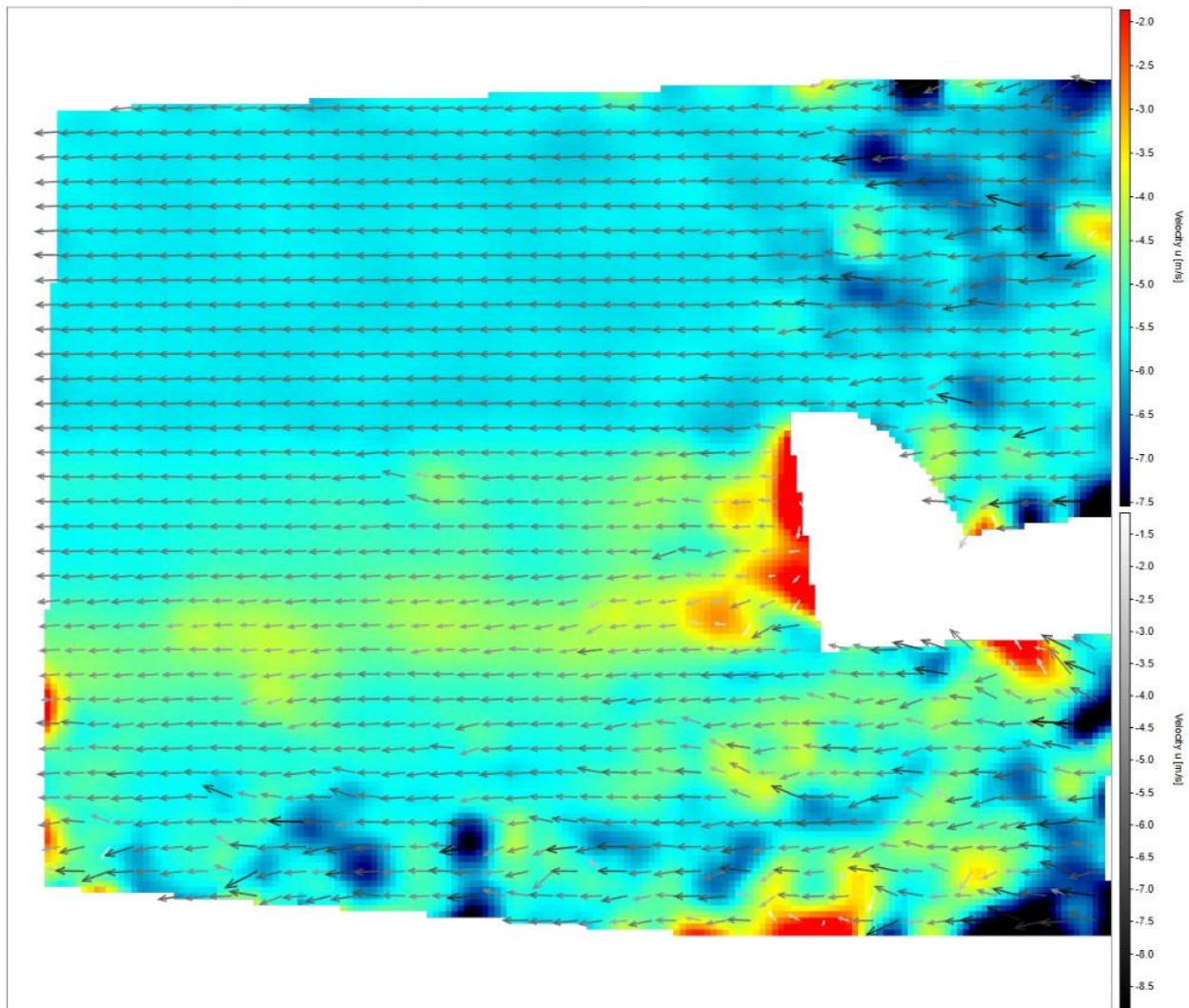
- b) **Vzájemná korelace** vytváří jeden vrchol, jehož vzdálenost od středu vyhodnocované oblasti definuje vektor posunutí s_a . Směr vektoru rychlosti je jednoznačný.



Přesná poloha korelačního vrcholu je hledána pomocí **subpixelové interpolace**, což je prokládání korelačních hodnot v korelační rovině nad jednotlivými pixely Gaussovou křivkou. Přesnost určení velikosti vektoru je pro vzájemnou korelaci až desetina pixelu. U autokorelace je přesnost řádově nižší.



Kromě korelačních vrcholů je v korelační mapě korelační šum. Jeho míra závisí na digitálním a optickém šumu PIV systému a na kvalitě surových dat. Kvalitní výsledky vyžadují dostatečný odstup signálu od šumu. Výsledkem PIV měření je **vektorová mapa**.



Korelační algoritmus pro správné fungování vyžaduje nalezení párů částic mezi expozicemi. V případě, že částice mezi pulzy laseru unikne z vyhodnocovaného okna, jedná se o tzv. **ztracený pár** a tato částice je pro výpočet nepoužitelná. To způsobuje nejčastější systematickou chybu PIV, kterou lze minimalizovat dostatečným sycením proudu částicemi a správnou volbou velikosti vyhodnocovaného okna vůči měřeným rychlostem. Z toho důvodu je nutné, aby v každém vyhodnocovaném okně byl dostatek částic. Pro jednotlivé expozice se uvádí 5 a pro dvojnásobnou expozici 10. Při zvětšení vyhodnocovacího okna však dochází ke snížení prostorového rozlišení a nemusí tak být podchyceny menší vírové struktury. Je-li nejmenší vírová struktura menší než vyhodnocovaná oblast, zvětšuje se šířka korelačního vrcholu, což lze interpretovat jako vyšší nejistotu měření.

Kalibrace:

Kalibrace systému je nutná, protože souřadnice obrazové roviny jsou v pixelech a zároveň obrazová rovina nebývá dokonale rovnoběžná s rovinou laserového řezu.

Kalibraci lze provádět dvojím způsobem:

- a) **Dvoubodové škálování** se použije v případě, že není možné použít kalibrační terč. V obrazové rovině se stanoví dva body se známou vzdáleností. To nelze použít v případě nelineární optiky (rybí oko apod.). Zároveň musí být kamera dokonale kolmá k laserové rovině a obraz musí být nezkreslen (lom světla na skle, ve vodě apod.).
- b) Kalibrace s **kalibračním terčem** je ideální způsob kalibrace. Lze tímto způsobem korigovat nerovnoběžnost obrazové a objektové roviny, optické nelinearity a zkreslení. Kalibrační terč je obvykle tmavá deska se světlými body rozmístěnými v definovaném vzoru. Kalibrace se provádí záznamem kalibračního terče, který je umístěn v objektové rovině. Následně jsou softwarově dopočítány konstanty mapovacích funkcí dále užívaných pro přepočítání souřadnic a výpočet rychlosti.

