



Způsoby měření rychlosti proudění a průtoku tekutin

Obsah přednášky

- **Způsoby měření rychlosti proudění tekutin**
- **Způsoby měření průtoku**

Způsoby měření rychlosti proudění tekutin

Měření rychlosti proudění

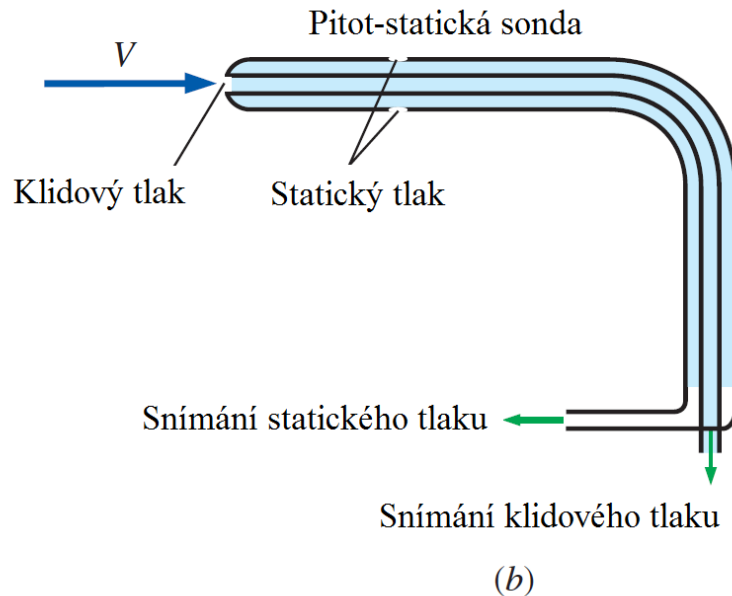
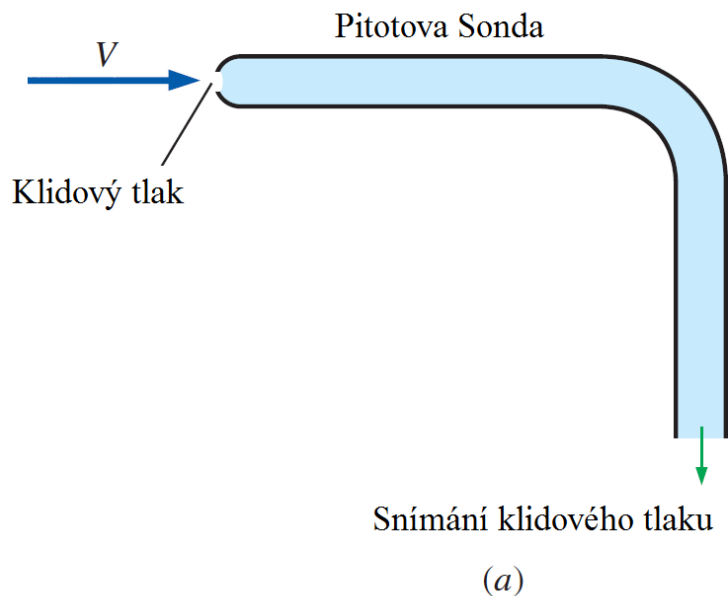
- **Metody měření rychlosti:**

1) *Pitotova a Pitotova-statická sonda*

2) *Termoanemometrická sonda (CTA/CCA)*

Měření rychlosti proudění Pitotovou sondou

- Pitotova a Pitotova-Statická (Prandtlova) sonda

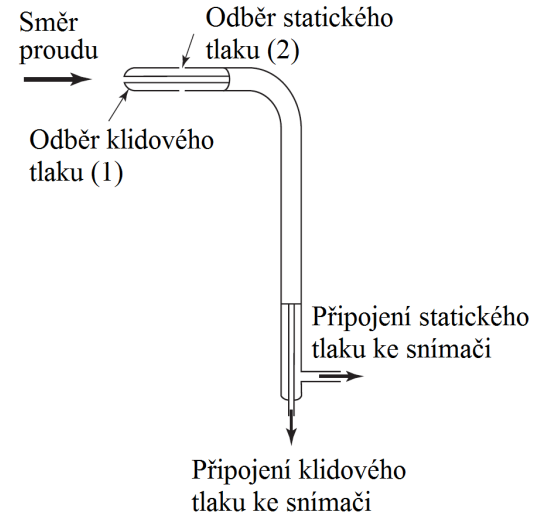
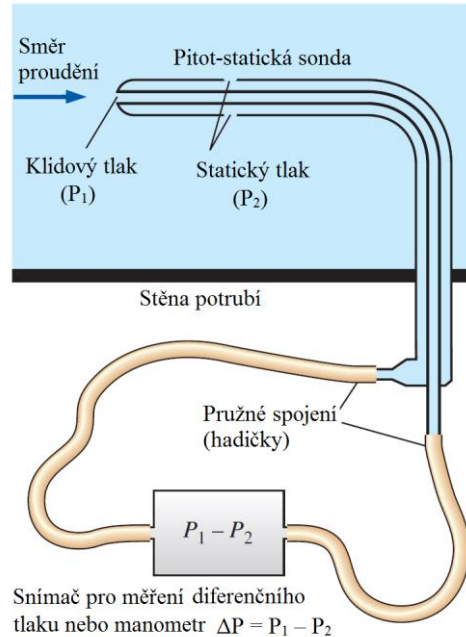


Pitotova a Pitotova-statická sonda

- **Pitotova** a **Pitotova-Statická** sonda jsou používány často pro měření rychlosti kapalin i plynů
- Obě sondy musí být rovnoběžné se směrem proudění ($\pm 5^\circ$), jinak vzniká při měření chyba
- Při dodržení správných podmínek při měření je přesnost do $\pm 5 \%$
- Obě sondy často používány v letectví
- Pitotova sonda vyžaduje samostatné měření statického tlaku (např. na stěně potrubí)
- Jedná se o **invazivní (kontaktní) bodovou metodu**

Pitotova-statická sonda

- Pitotova-Statická sonda (Prandtlova sonda)



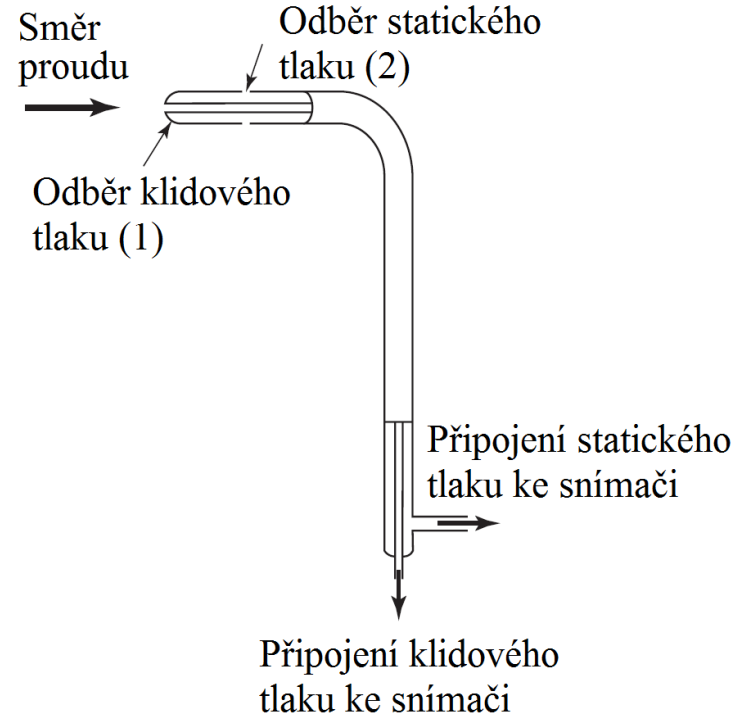
Pitotova-statická sonda (2)

- Pitotova-Statická sonda (Prandtlova sonda)

$$v_2 = C \sqrt{\frac{2[(p_1 + \rho g z_1) - (p_2 + \rho g z_2)]}{\rho}}$$

- Pro plyny často platí, že $z_1, z_2 = 0$, a tak platí vztah

$$v_2 = C \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} = C \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$



Pitotova-statická sonda (3)

- Pro odběr klidového tlaku platí $v_1 \approx 0 \text{ m/s}$
- Pro odběr statického tlaku platí $v_2 \approx \text{rychlost proudu}$
- Konstanta C je korekcí na skutečnou rychlost vlivem přítomnosti sondy
- C se určuje z kalibrace nebo uvádí výrobce sondy

$$v_2 = C \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} = C \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

Pitotova sonda

- **Pitotova sonda měří pouze klidový (celkový) tlak**, statický tlak musí být měřen samostatně, např. na stěně apod.
- **Pitotova sonda je obvykle menší** než Pitotova-Statická sonda
- To má výhodu při přesnějších měření rychlostních profilů, např. u stěny

$$v_2 = C \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} = C \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

Pitotova a Kielova sonda

- **Pitotova sonda měří pouze klidový (celkový) tlak**, statický tlak musí být měřen samostatně, např. na stěně apod.
- **Pitotova sonda je obvykle menší** než Pitotova-Statická sonda
- To má výhodu při přesnějších měření rychlostních profilů, např. u stěny
- Vylepšenou verzí Pitotovy sondy je tzv. Kielova sonda

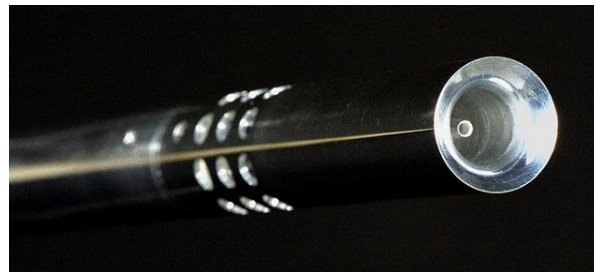
$$v_2 = C \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} = C \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$



Pitotova a Kielova sonda

- **Pitotova sonda měří pouze klidový (celkový) tlak**, statický tlak musí být měřen samostatně, např. na stěně apod.
- **Pitotova sonda je obvykle menší** než Pitotova-Statická sonda
- To má výhodu při přesnějších měření rychlostních profilů, např. u stěny
- Vylepšenou verzí Pitotovy sondy je tzv. Kielova sonda

$$v_2 = C \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} = C \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$



Příklad využití Pitotových sond



Příklad využití Pitotových/Kielových sond

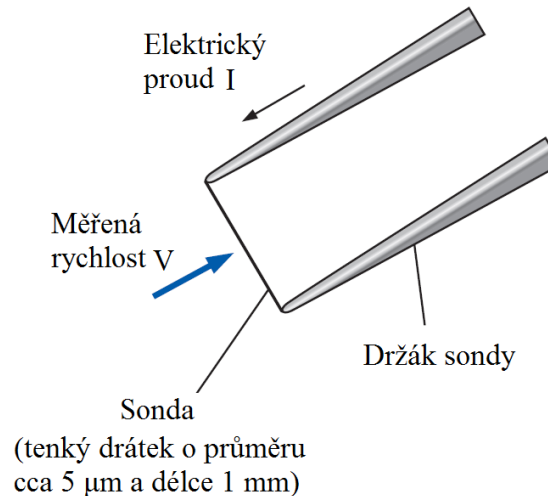


Metoda žhaveného drátku

- **Termoanemometrie (metoda žhaveného drátku)** – 2 možné režimy měření (CTA/CCA)

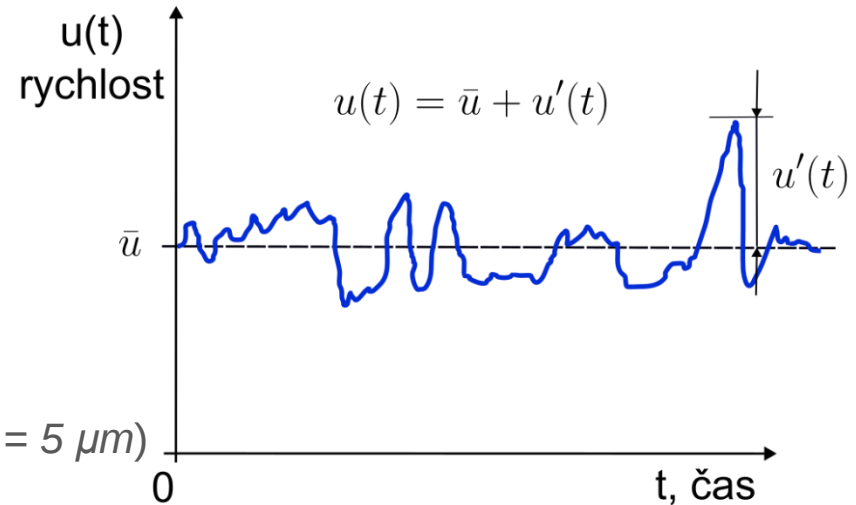
1) CTA (Constant Temperature Anemometry) **pro měření rychlosti a jejich fluktuací**

2) CCA (Constant Current Anemometry) **pro měření teploty a jejich fluktuací**



Metoda žhaveného drátku (2)

- **CTA** režim využíván častěji
- Pro **měření rychlosti** (a jejich fluktuací)
- Jedná se o **invazivní bodovou metodu**
- **Sondy** jsou většinou **velmi malé** ($l = 1 \text{ mm}$, $\varnothing d = 5 \text{ }\mu\text{m}$)
- Poměrně sofistikovaná měřicí metoda, avšak osvědčená v praxi
- **Míra ochlazování žhaveného drátku je úměrná rychlosti proudící tekutiny**

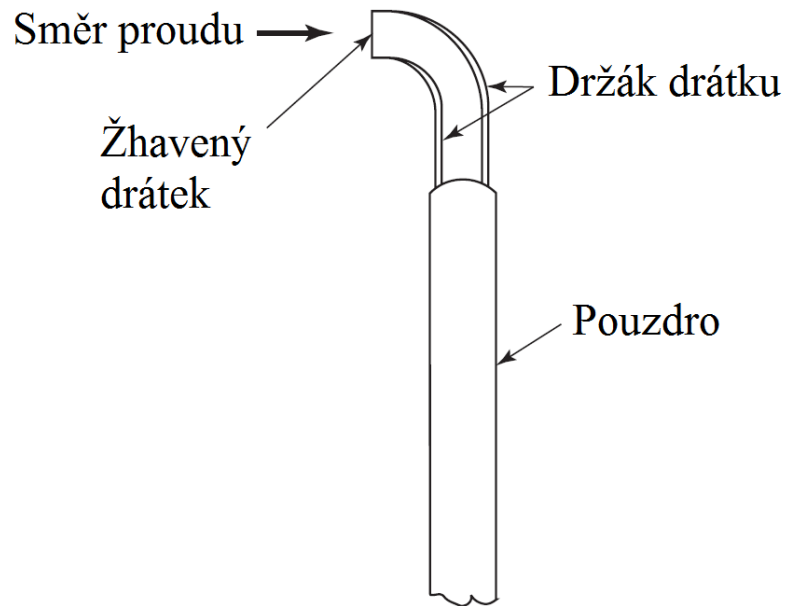
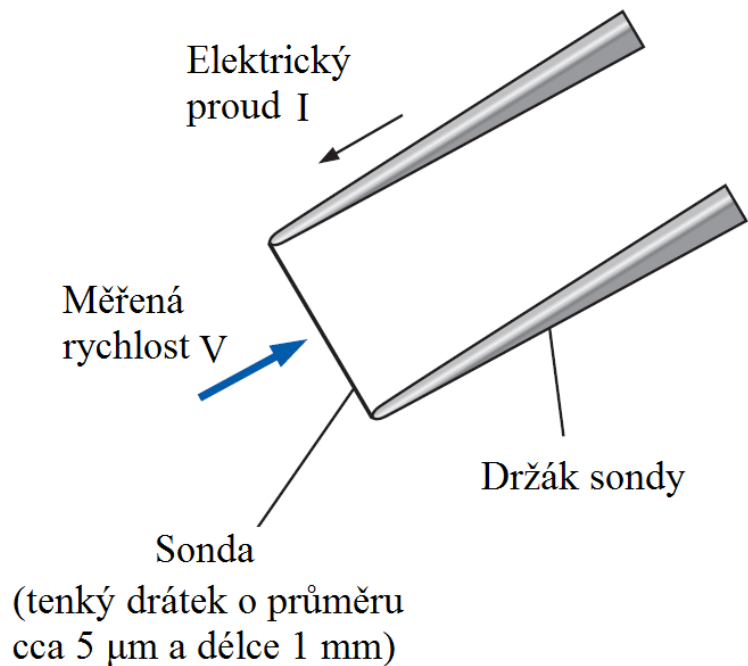


Metoda žhaveného drátku (3)

- Relativně snadná aplikace
- Velký rozsah měřených hodnot (dle typu sondy)
- Lze měřit rychlost v bodě ve všech směrech (x, y, z) – speciální sondy
- Vysoká citlivost
- Poskytuje poměrně přesné výsledky (v případě řádné kalibrace sondy)
- Sondy jsou obvykle **náchylné na poškození** (manipulace, nečistoty v tekutině apod.)

Metoda žhaveného drátku - Princip

- Při režimu CTA je drátek (Pt) obvykle ohříván na teplotu **200–500 °C**



Metoda žhaveného drátku – základní vztahy

- 3 základní zákony: **Jouleův** zákon, **Newtonův** ochlazovací zákon, **Kingův** zákon
- **Předpokládá odvod tepla pouze prouděním (konvekci)**, radiace, vedení a akumulace nejsou uvažovány

$$\dot{Q} = \frac{U^2}{R} = A\alpha\Delta T = (A_0 + B_0 Re^{0.5})\Delta T = (a_0 + b_0 v^{0.5})\Delta T$$

$$\Delta T = (T_{sonda} - T_{tek})$$

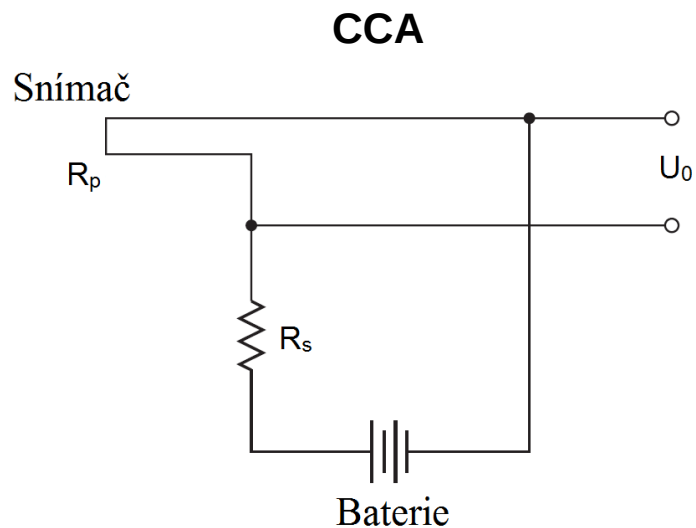
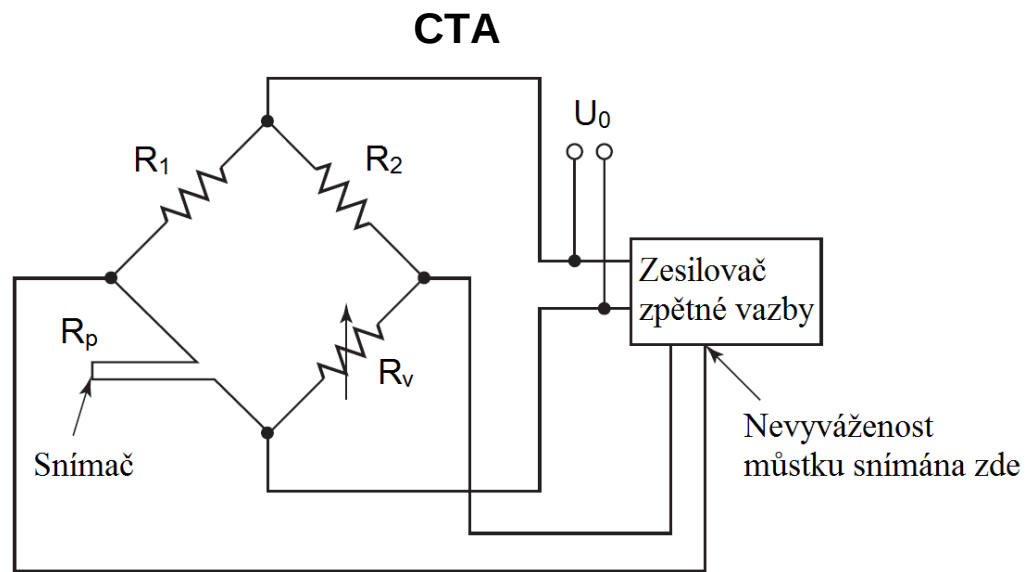
$$U^2 = A_1 + B_1 v^{0.5}$$

**Kingův
zákon**

- $A_0, B_0, A_1, B_1, a_0, b_0$ jsou konstanty
- $Re = \rho \frac{vD}{\mu}$ je Reynoldsovo číslo

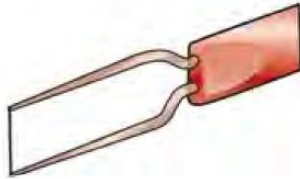
Elektrické obvody režimů

- Režimy CTA/CCA – elektrické zapojení (Ohmův zákon $U = RI$)



Typy anemometrických sond

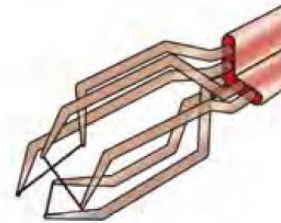
- Měření více složek rychlosti



1D

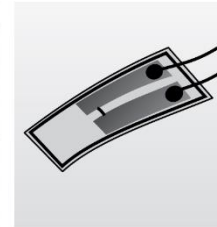
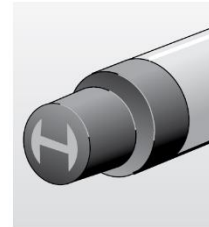
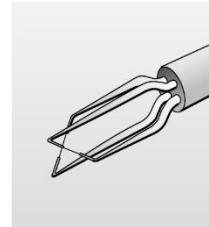
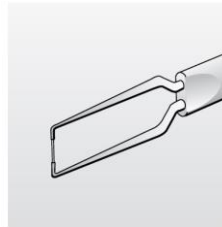
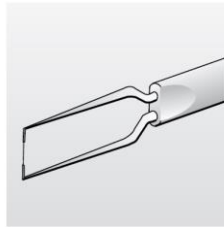
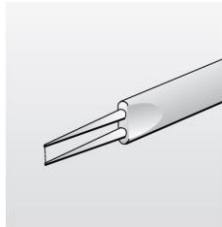


2D



3D

- Různé typy sond



Příklady využití anemometrických sond



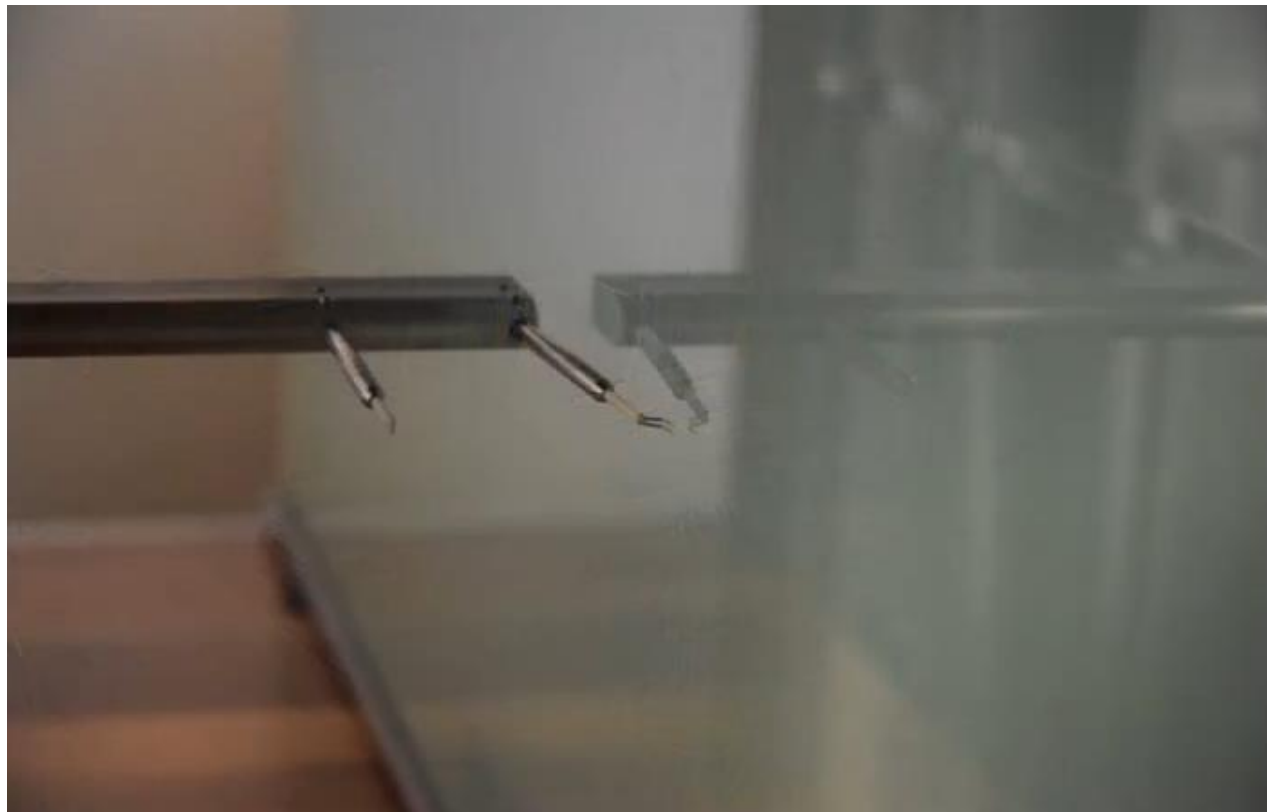
Příklady využití anemometrických sond (2)



Příklady využití anemometrických sond (2)



Příklady využití anemometrických sond (2)



Způsoby měření průtoku

Měření průtoku

- **Základní metody měření průtoku tekutin:**

- 1) *Pomocí tlakové difference (objemový i hmotnostní)*
- 2) *Měření objemového toku*
- 3) *Měření hmotnostního toku*
- 4) *Ostatní metody (měření rychlosti, otáček, šíření zvuku apod.)*

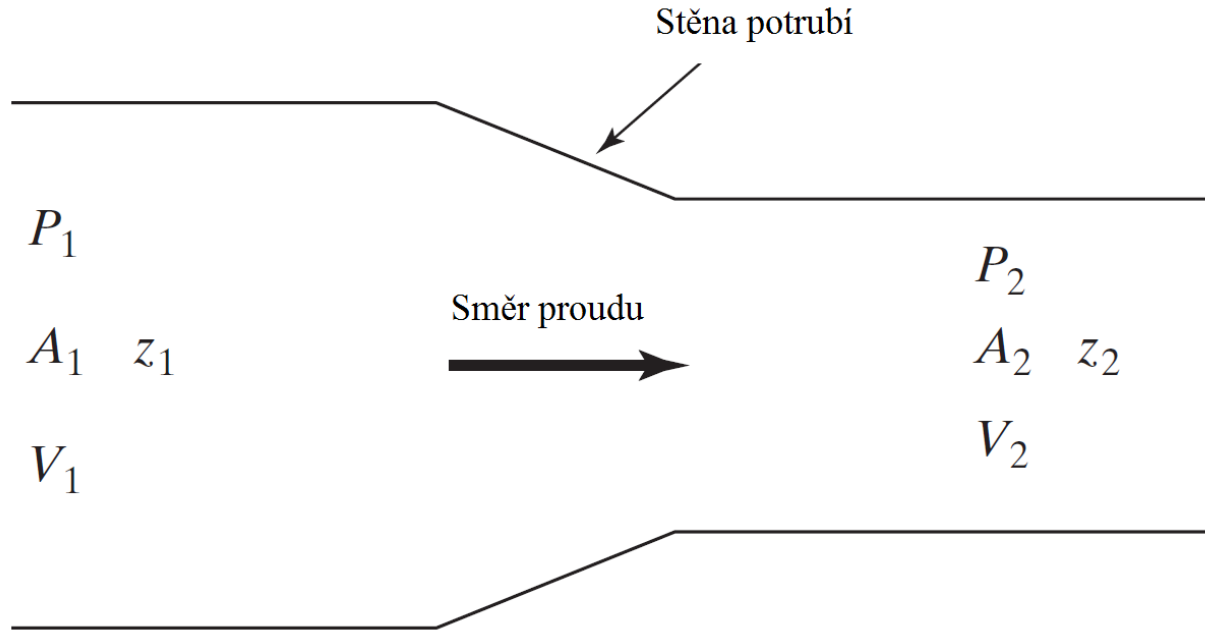
- Každá z uvedených metod je použita v různých typech přístrojů, možné jsou i jejich kombinace a dělení není vždy úplně jednoznačné

Průtokoměry na základě měření tlakové difference

- Používají se především pro měření objemového průtoku, ale lze vyhodnotit i hmotnostní průtok
- **Základní typy průtokoměrů na základě tlakové difference:**
 - 1) *Venturiho trubice*
 - 2) *Normalizovaná dýza*
 - 3) *Normalizovaná clona*

Měření průtoku pomocí tlakové difference (ISO 5167)

- Měření průtoku pomocí překážky vložené do potrubí, jehož průřez je zcela zaplněn tekutinou



Měření průtoku pomocí tlakové difference (ISO 5167) (2)

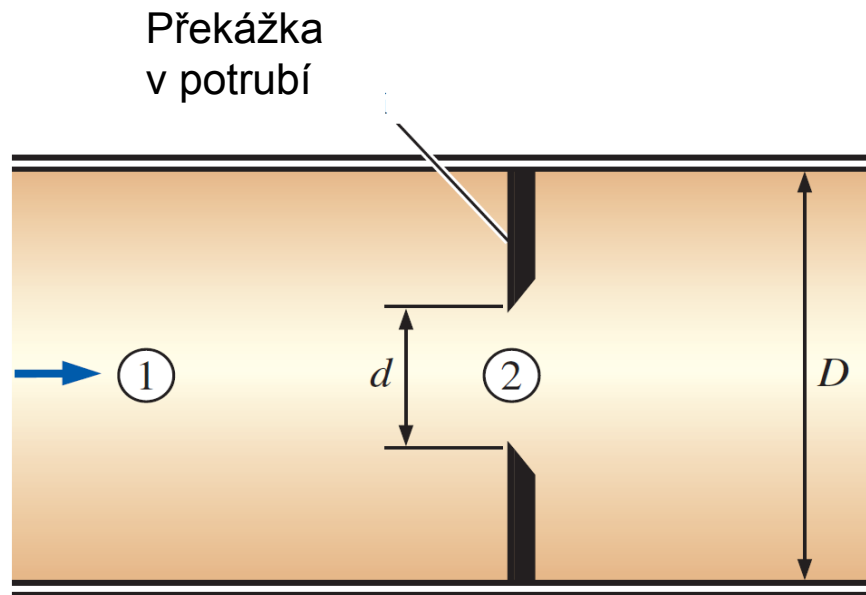
- Pro určení objemového průtoku, za určitých podmínek lze získat i hmotnostní průtok

$$\dot{V} = C \frac{A_2}{\sqrt{1-(\beta)^2}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

$$\Delta p = p_1 - p_2$$

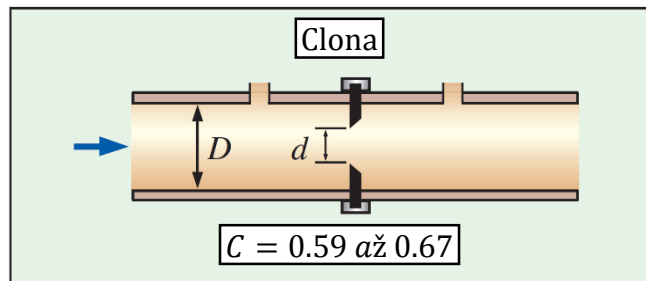
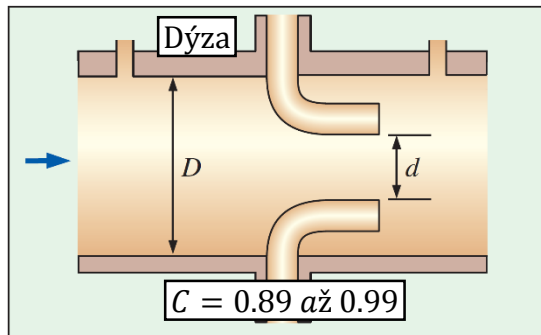
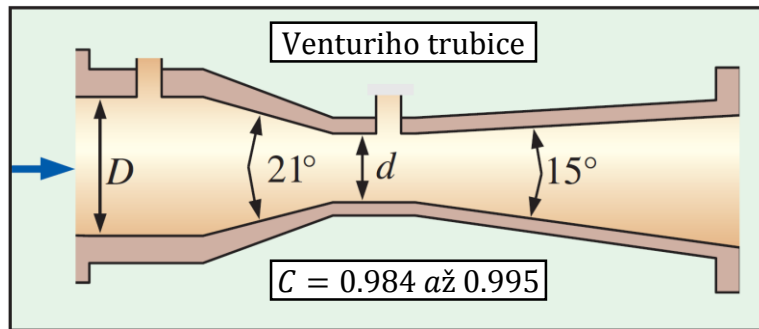
$$\beta = A_2/A_1$$

$$\dot{m} = \rho \dot{V}$$



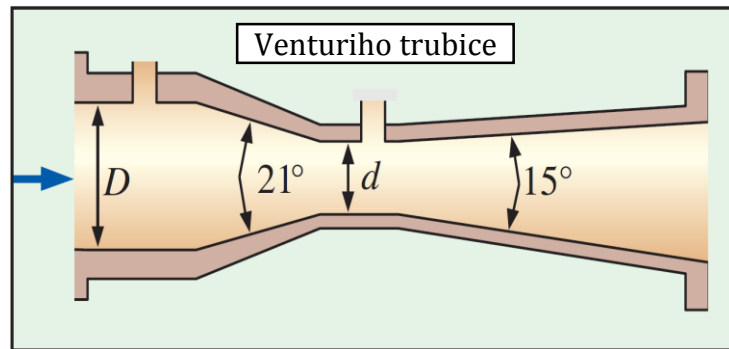
Měření průtoku pomocí tlakové difference (ISO 5167) (3)

- Norma ISO 5167 rozlišuje 3 základní typy: **Venturiho trubice**, **dýza**, **clona**



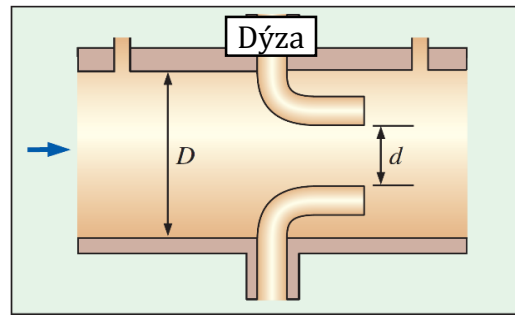
Měření průtoku pomocí Venturiho trubice

- Norma ISO 5167 - 4
- Tekutina je urychlena v kuželovém konfuzoru (místní pokles statického tlaku)
- V následující části (difuzoru), se tlak téměř vrací na úroveň tlaku před zúžením
- Výhodou Venturiho trubice je **menší tlaková ztráta a vyšší přesnost měření než u clony a dýzy**
- Nevýhodou je poměrně **vysoká cena**



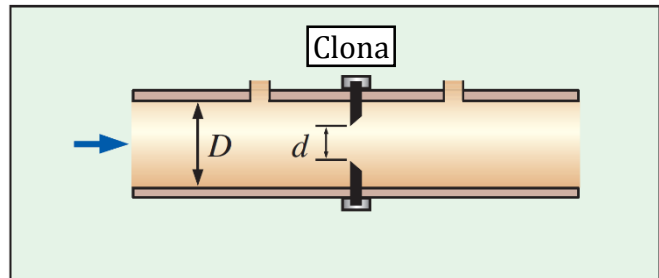
Měření průtoku pomocí dýzy

- Norma ISO 5167 - 3
- Jedná se o **kompromis mezi clonou a Venturiho trubicí**
- Na rozdíl od Venturiho trubice neobsahuje difuzor
- Dýzy umožňují měřit větší průtok než clony a také umožňují měřit průtok u tekutin, které obsahují větší pevné částice
- **V porovnání s Venturiho trubicí jsou dýzy levnější, ale jsou méně přesné a způsobují větší tlakovou ztrátu**



Měření průtoku pomocí clony

- Norma ISO 5167 - 2
- Clona je plochá deska s otvorem (kov, plast), která je vložena do potrubí mezi příruby
- Průměr škrticího otvoru a jeho umístění závisí na typu měřené tekutiny a požadovaném rozsahu měření (soustředný otvor, ale používá se i excentrický či segmentový typ)
- Jsou **náchylné vůči opotřebení**, které může být způsobeno znečištěným médiem nebo médiem s částicemi
- Použití pro **měření průtoku většiny čistých tekutin**
- **Relativně nízká cena**



Praktické ukázky normalizovaných prvků

Venturiho trubice



Dýza



Clona



Objemové průtokoměry

- Používají se především pro měření objemového průtoku

- **Typy objemových průtokoměrů:**

- 1) *Plováčkový průtokoměr*
- 2) *Turbínkový (vrtulkový) průtokoměr*
- 3) *Lopatkový (vrtulkový) průtokoměr*
- 4) *Objemový průtokoměr*
- 5) *Vírový průtokoměr*
- 6) *Ultrazvukový průtokoměr*
- 7) *Indukční průtokoměr*
- 8) *Odporový průtokoměr*

Plováчковý průtokoměr

- Také označován jako **rotametr**
- Často svisle umístěná kónická měřicí trubice, rozšiřující se směrem nahoru
- Uvnitř se volně pohybuje plovák s hustotou větší než je hustota měřené tekutiny
- Pokud tekutina neproudí, je plovák v trubici dole
- Jakmile začne tekutina proudit, začne se plovák zvedat



Plováčkový průtokoměr (2)

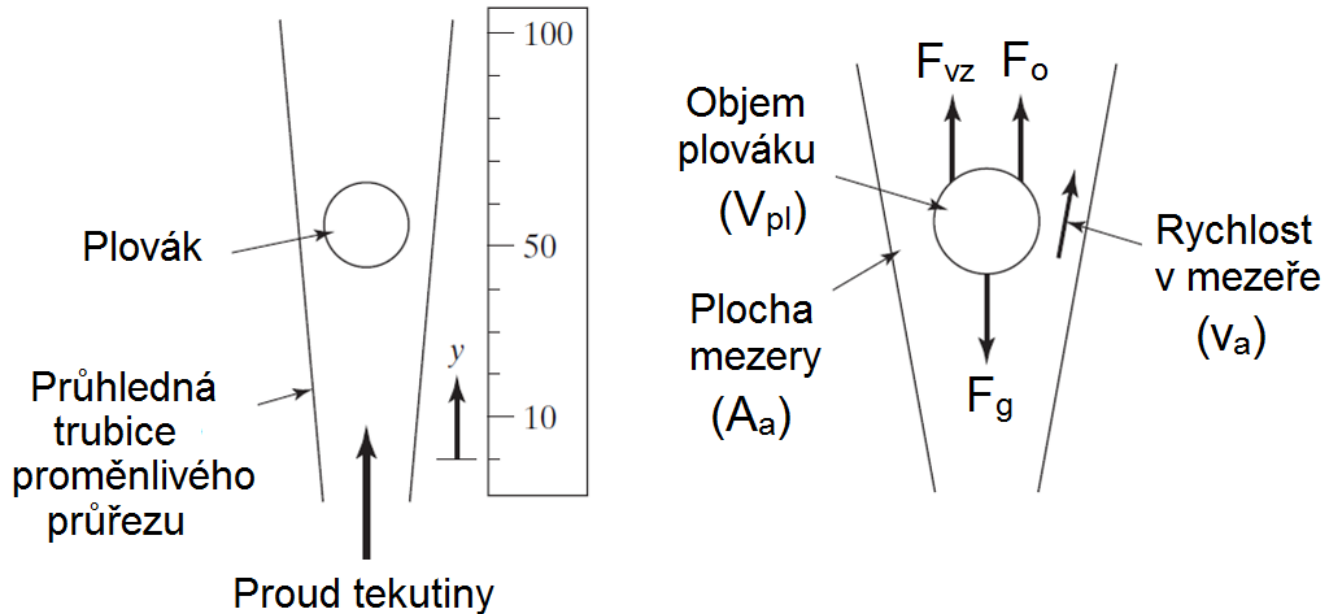
- Zdvih plováku je úměrný rychlosti proudění
- Je možné také horizontální uspořádání (pružina)
- Tvar plováku závisí na účelu použití
- Poloha plováčku se zjišťuje buď přímo na stupnici na stěně skleněné trubice průtokoměru, nebo se snímá elektricky
- Stupnice ukazuje přímo průtok (např. l/min) nebo procenta z celkového rozsahu (%)

Plováчковý průtokoměr (3)

- Mezi výhody těchto průtokoměrů patří relativně jednoduchý odečet průtoku, malá tlaková ztráta a lineární závislost mezi ukazatelem stupnice a průtokem
- Nevýhodou je poměrně nízká přesnost ($\pm 5\text{--}10\%$)
- **Kalibrováno vždy pro danou tekutinu a její vlastnosti** (tlak, teplota, viskozita), přesnost není většinou lepší než $\pm 2\%$
- **Lze provést korekci** pro měření jiné tekutiny nebo za jiných podmínek, avšak přesnost měření je tímto krokem snížena ($\pm 10\%$)

Plováчковý průtokoměr – princip

- Při určitém průtoku **plovák zaujme rovnovážnou polohu s takovou plochou mezikruží, při níž je síla nadnášející plovák právě rovna gravitační síle**



Plováčkový průtokoměr – princip

$$F_{vz} + F_o - F_g = 0$$

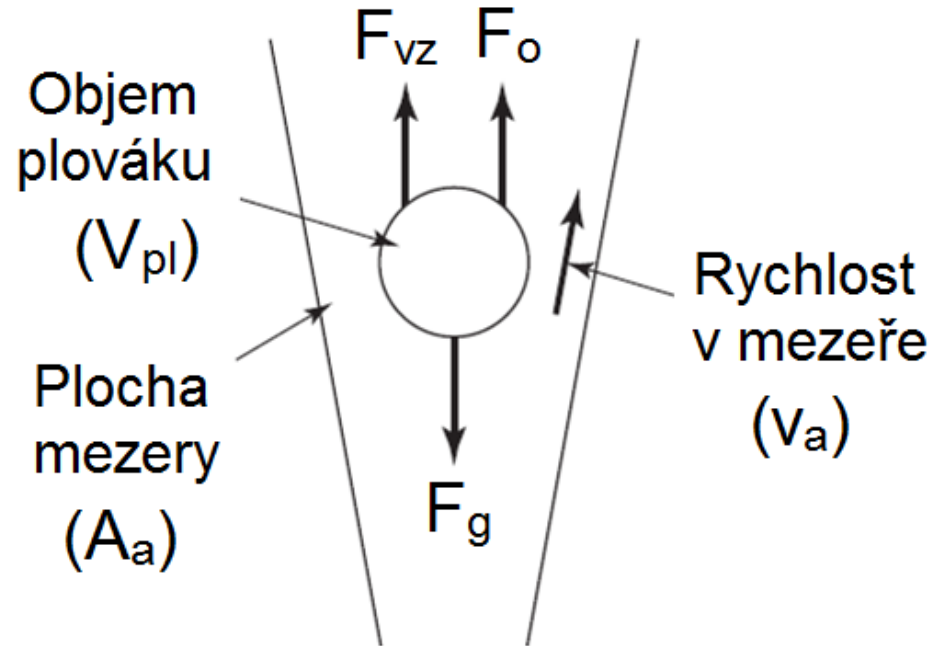
$$F_{vz} = \rho_{tek} V_{pl} g$$

$$F_o = \frac{1}{2} C_D \rho_{tek} v_{ref}^2 A_{ref}$$

$$F_g = \rho_{pl} V_{pl} g$$

$$v_{ref} = v_a$$

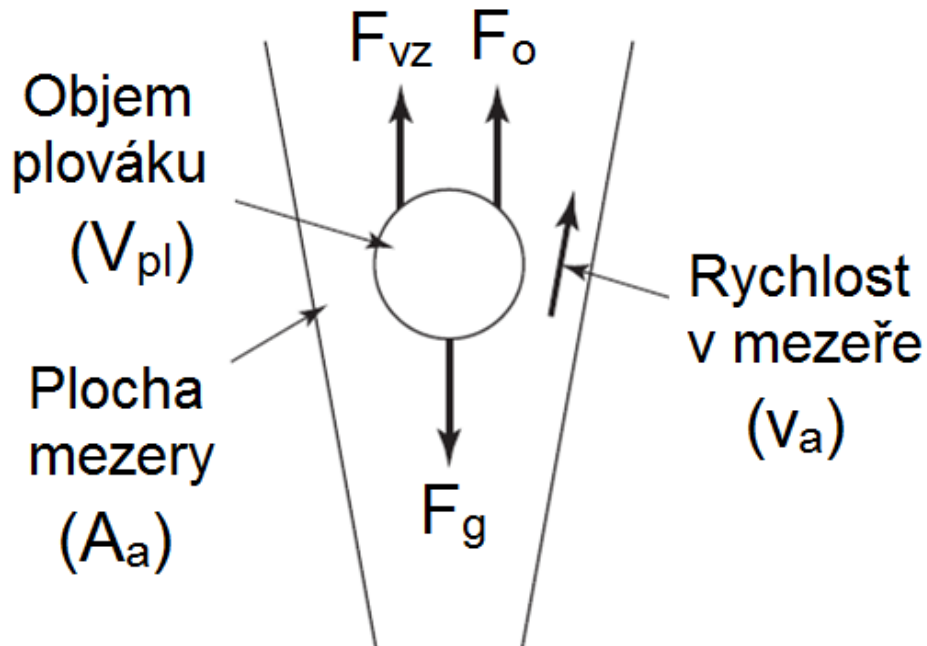
$$A_{ref} = \frac{\pi d^2}{4} \text{ (plovák ve tvaru koule)}$$



Plováčkový průtokoměr – princip

$$F_{vz} + F_o - F_g = 0$$

$$\rho_{tek} V_{pl} g + \frac{1}{2} C_D \rho_{tek} v_a^2 A_{ref} - \rho_{pl} V_{pl} g = 0$$



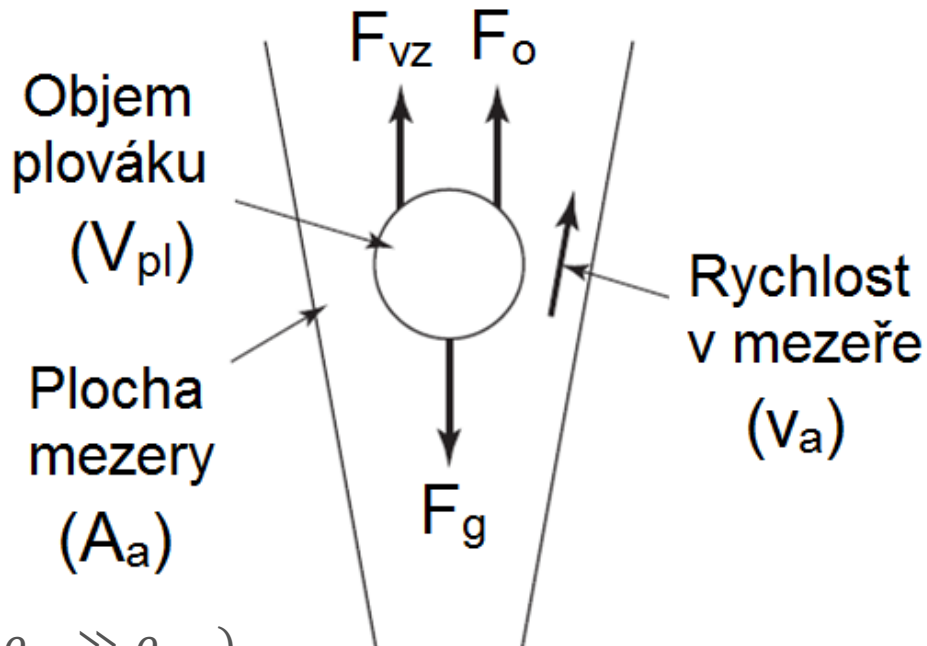
Plováчковý průtokoměr – princip

$$F_{vz} + F_o - F_g = 0$$

$$\rho_{tek} V_{pl} g + \frac{1}{2} C_D \rho_{tek} v_a^2 A_{ref} - \rho_{pl} V_{pl} g = 0$$

$$v_a = \sqrt{\frac{2V_{pl}g(\rho_{pl} - \rho_{tek})}{C_D \rho_{tek} A_{ref}}}$$

$$v_a = \sqrt{\frac{2V_{pl}g\rho_{pl}}{C_D \rho_{tek} A_{ref}}} \quad (v \text{ případě, že } \rho_{pl} \gg \rho_{tek})$$



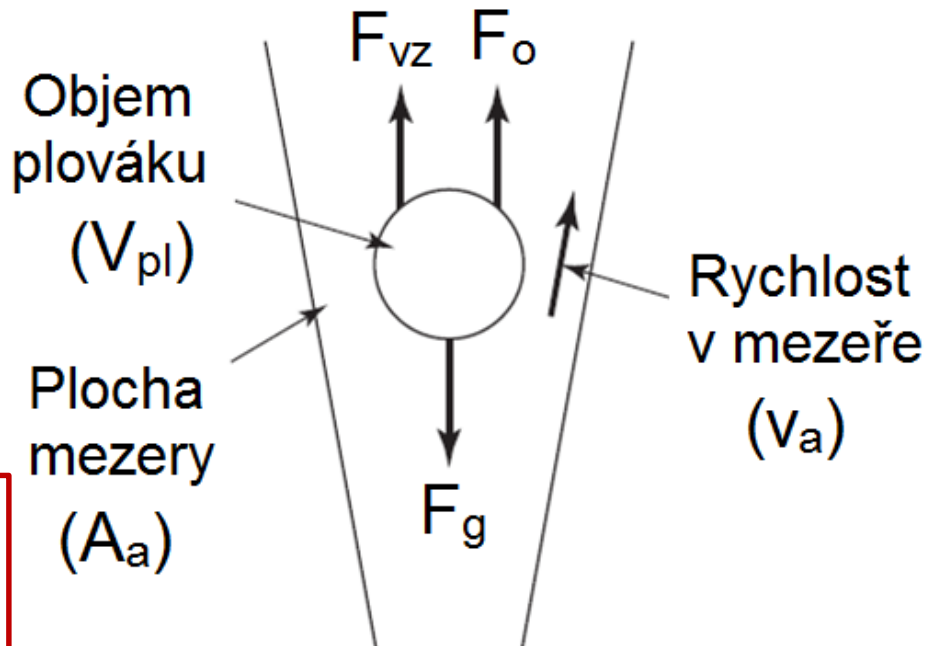
Plováчковý průtokoměr – princip

$$F_{vz} + F_o - F_g = 0$$

$$\rho_{tek} V_{pl} g + \frac{1}{2} C_D \rho_{tek} v_a^2 A_{ref} - \rho_{pl} V_{pl} g = 0$$

$$v_a = \sqrt{\frac{2V_{pl}g(\rho_{pl} - \rho_{tek})}{C_D \rho_{tek} A_{ref}}}$$

$$\dot{V} = v_a A_a = \sqrt{\frac{2V_{pl}g(\rho_{pl} - \rho_{tek})}{C_D \rho_{tek} A_{ref}}} A_a$$



Plováчковý průtokoměr – Ukázka



Vrtulkový průtokoměr

- Používán především **pro měření objemového průtoku čistých kapalin**
- Jsou možná různá uspořádání: **turbínkový, lopatkový**
- Turbínka či lopatkové kolo často vyrobeny z magnetického materiálu
- Magnetický snímač pak reaguje na pohyb lopatek a generuje elektrický pulz
- **Výstupní signál je většinou frekvence** úměrná velikosti průtoku
- Náchylné na opotřebení a zanášení vlivem nečistot (vhodné pro čisté tekutiny)

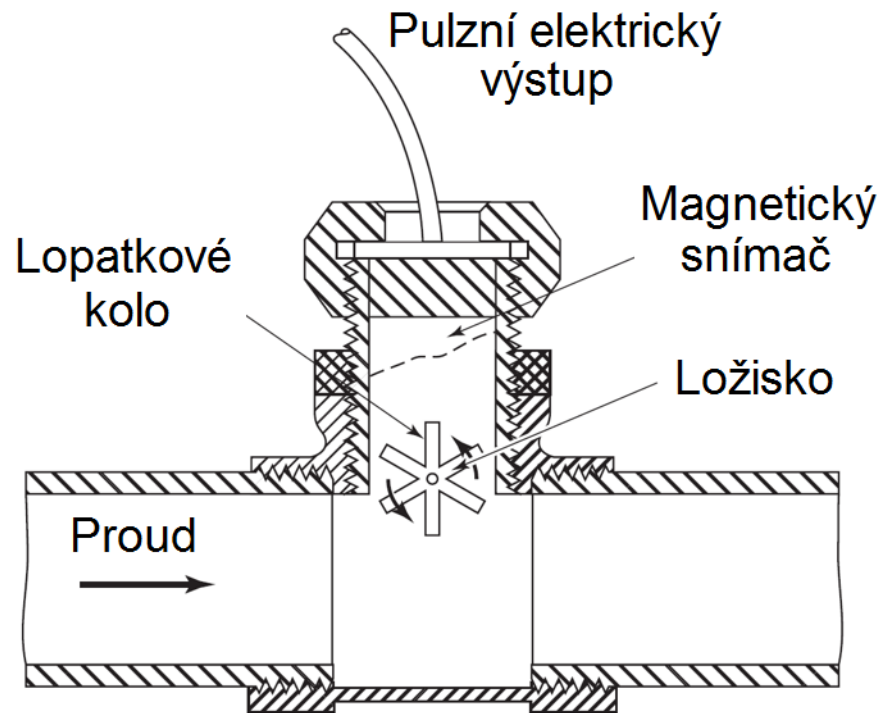
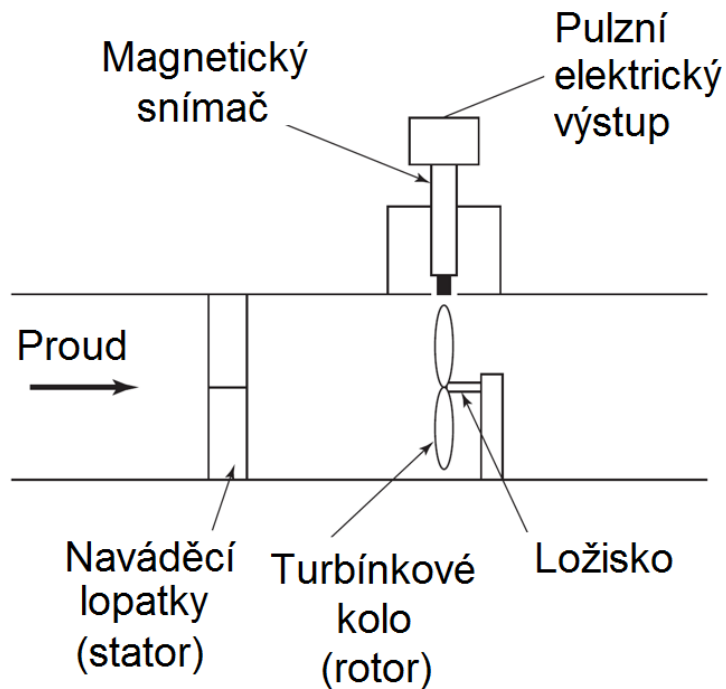
Vrtulkový průtokoměr (2)

- Poměrně vysoká přesnost ($\pm 1-2 \%$)
- Někdy využívá namísto magnetického snímače fotočlánek
- Způsobuje tlakovou ztrátu v proudu, ale záleží na konstrukci
- **Turbínkový průtokoměr** má turbínkové kolo, které **zasahuje celým objemem do měřené tekutiny**

Vrtulkový průtokoměr (3)

- Z tohoto důvodů byly vyvinuty lopatkové průtokoměry, jejichž tlaková ztráta je menší až někdy zanedbatelná
- **Lopatkový průtokoměr** má lopatkové kolo umístěné na straně vnitřního kanálu a **nezasahuje celým objemem do měřené tekutiny**
- Lopatkový průtokoměr je relativně levný

Turbínkový a lopatkový průtokoměr

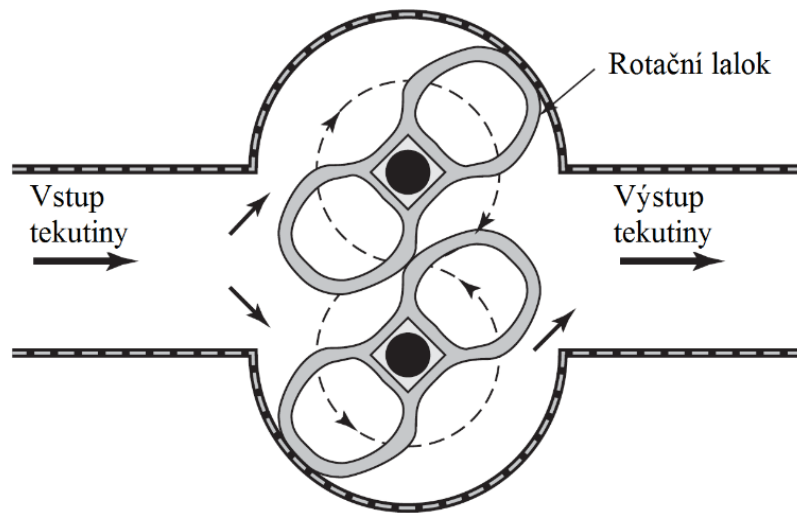


Turbínkový a lopatkový průtokoměr – Ukázka

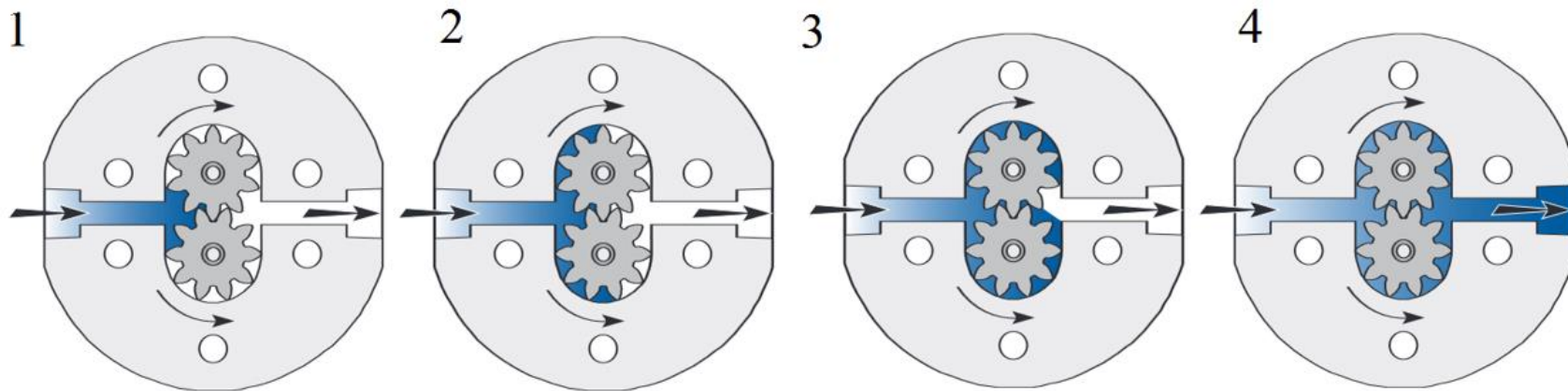


Objemový průtokoměr

- Princip založen na známém objemu komory nebo meziprostoru v průtokoměru
- Při jedné otáčce rotujících členů se **přemístí známé množství tekutiny**
- **Snímáním otáček lze pak dopočítat celkové přemístěné množství za jednotku času**
- Pro měření průtoku kapalin (častější) i plynů



Objemový průtokoměr - Princip



Objemový průtokoměr - Ukázka



Vírový průtokoměr

- Pokud je do proudu tekutiny vložena překážka (generátor vírů), dochází při určitých Reynoldsových číslech k **odtrhávání tekutiny od překážky s určitou pravidelností, tj. s určitou frekvencí**
- Překážkou je nejčastěji koule nebo válec, ale používají se i jiné geometrické tvary
- **Frekvenci odtrhávání vírů** lze popsat bezrozměrným **Strouhalovým číslem**

$$St = \frac{fD}{v}$$

- Bylo zjištěno, že $St = f(Re)$, avšak v poměrně velkém rozsahu Reynoldsových čísel nabývá Strouhalovo číslo téměř konstantní hodnotu ($St = 0.20\text{--}0.21$)

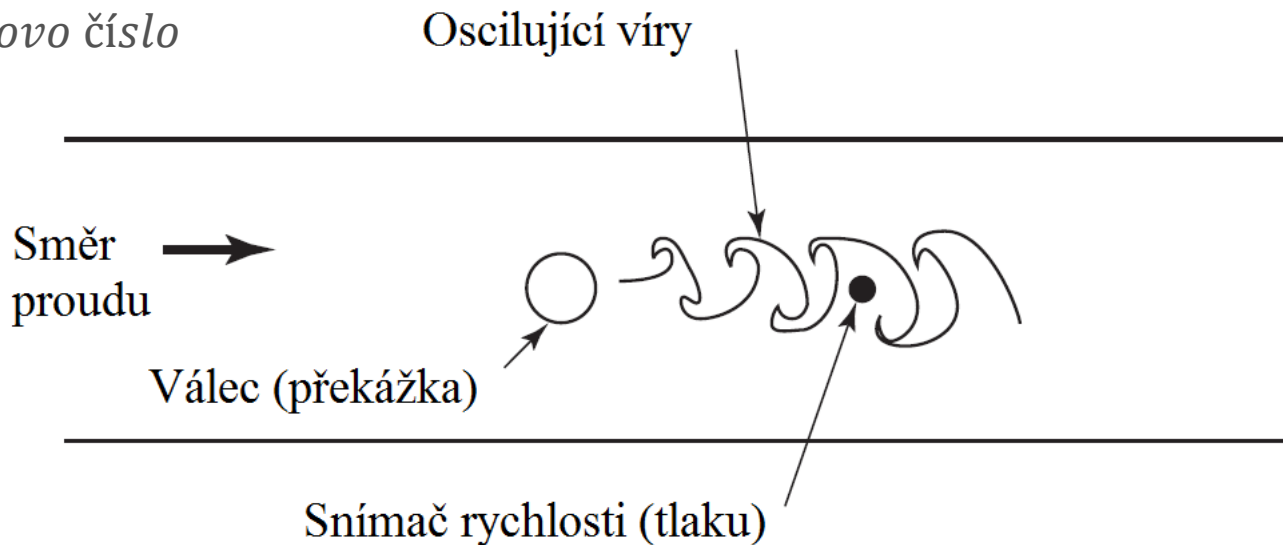
Vírový průtokoměr - Princip

- **Měřením frekvence odtrhávání vírů lze určit rychlost proudění tekutiny**
- Nevhodné pro malé průtoky a kapaliny s velkou viskozitou

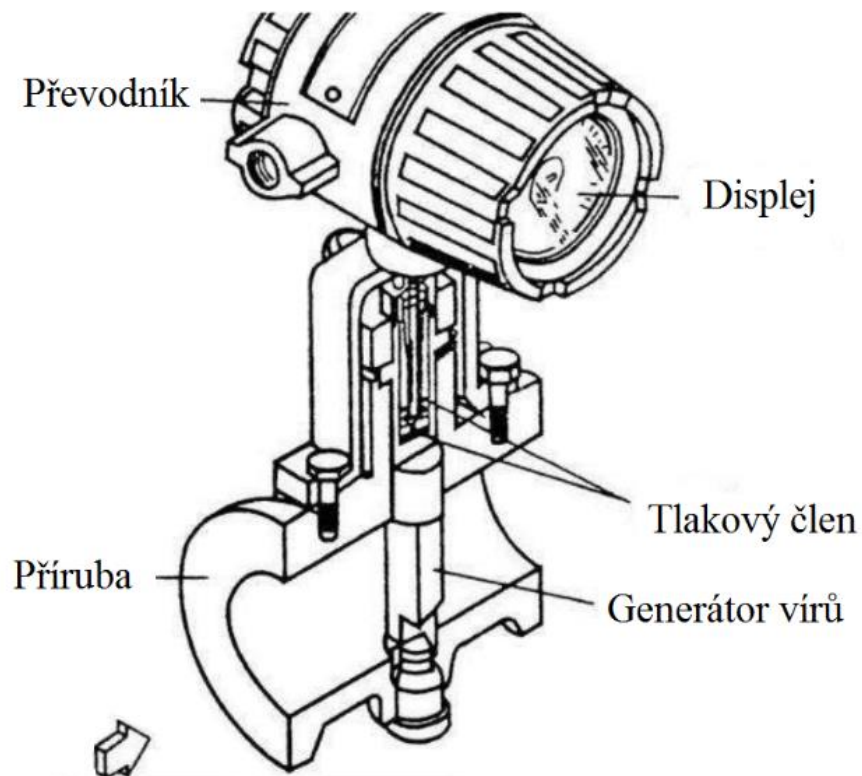
$$St = \frac{fD}{v} \quad \dots \text{Strouhalovo číslo}$$

$$v = \frac{fD}{St}$$

$$\dot{V} = vA$$



Vírový průtokoměr - Ukázka



Ultrazvukový průtokoměr

- Využívá ultrazvukového vlnění
- Především pro měření průtoku kapalin, ale existují výjimky
- **Neinvazivní** metoda měření
- Obvykle docela přesné ($\pm 1\text{--}5\%$), ale záleží na použití
- Vhodné **pro čisté i znečištěné tekutiny** (záleží na konfiguraci přístroje)

Ultrazvukový průtokoměr - Princip

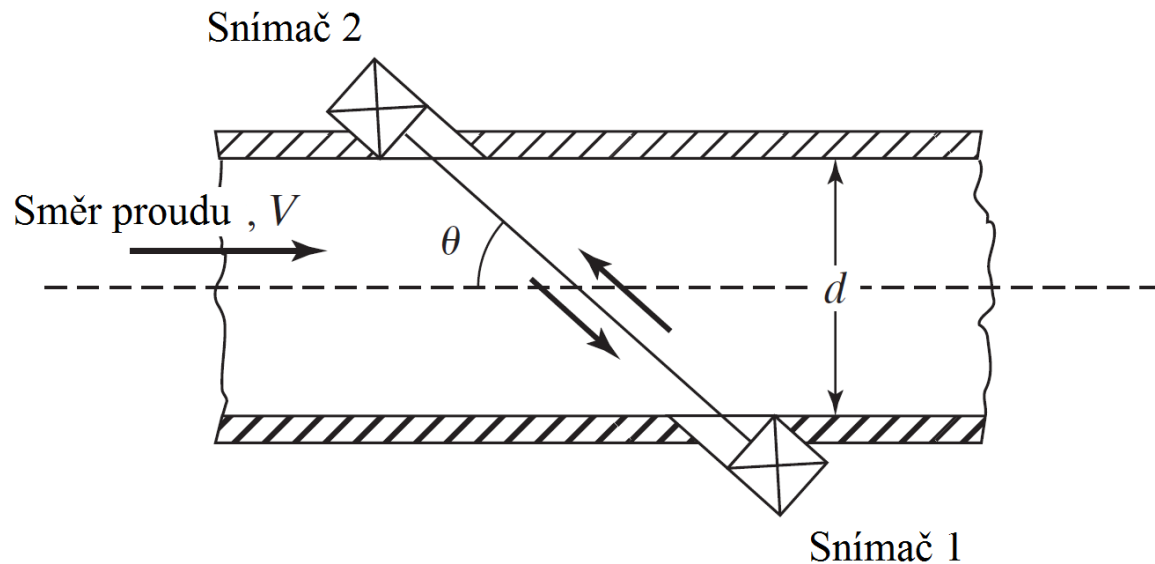
$$T_{1,2} = \frac{d}{\sin\theta(a - v\cos\theta)}$$

$$T_{2,1} = \frac{d}{\sin\theta(a + v\cos\theta)}$$

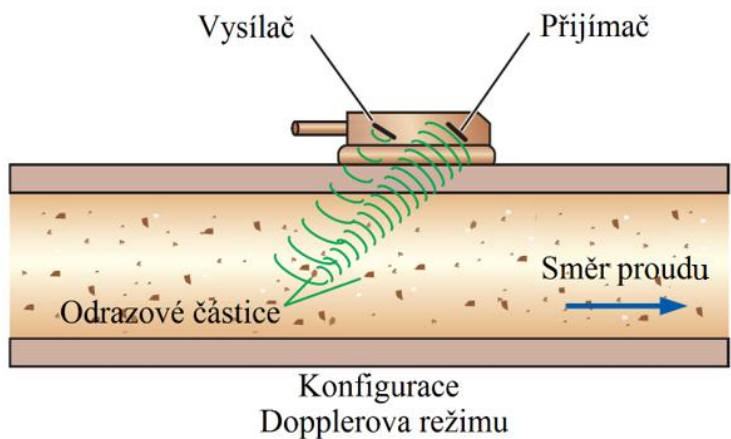
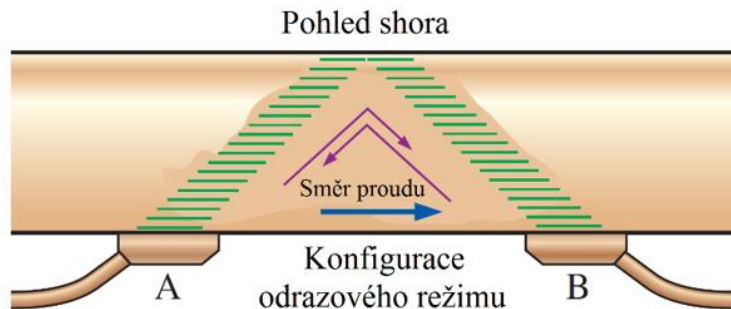
$$\frac{T_{1,2} - T_{2,1}}{T_{1,2} T_{2,1}} = \frac{2v\sin\theta\cos\theta}{d}$$

$$v = \frac{d}{2\sin\theta\cos\theta} \frac{T_{1,2} - T_{2,1}}{T_{1,2} T_{2,1}}$$

$$\dot{V} = vA$$



Ultrazvukový průtokoměr - Ukázka



Indukční průtokoměr

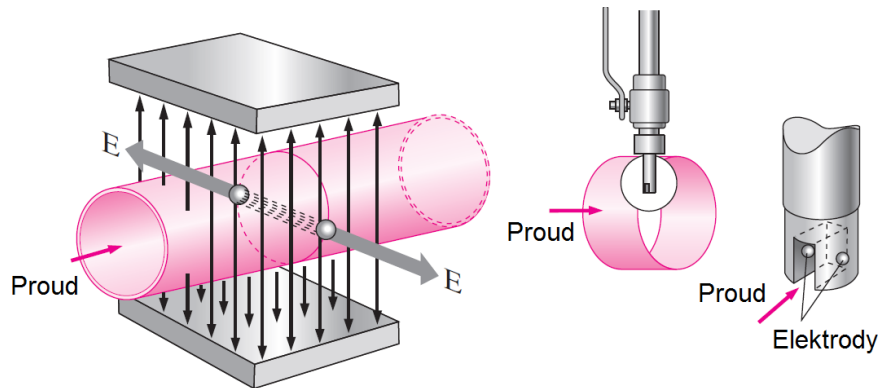
- Znám také jako **(elektro)magnetický** průtokoměr
- Založen na elektromagnetické indukci (M. Faraday)
- Generované elektromotorické **napětí je závislé na rychlosti proudění vodivé tekutiny**
- **Nepoužitelný pro vodu** a většinu čistých organických kapalin, které mají nízkou elektrickou vodivost
- **Vhodný pro měření průtoku tekutých kovů** (rtuť, sodík, draslík, ...)

Indukční průtokoměr (2)

- **Musí být kalibrován speciálně pro danou tekutinu**
- Mohou být **invazivní i neinvazivní provedení**
- **Bez pohyblivých částí**
- Poměrně náročný na spotřebu el. energie

$$U_i = Blv$$

$$\dot{V} = vA$$



Indukční průtokoměr - Ukázka



Odporový průtokoměr

- Založen na **měření odporové síly odporového (tuhého) členu**, který zasahuje do tekutiny
- Snímač síly není v přímém kontaktu s měřenou tekutinou, síla je přenášena přes rameno
- Poměrně vysoká přesnost ($\pm 0.2 \%$)
- Kvalitnější přístroje umožňují nastavení tuhosti odporového členu
- Vhodný pro měření široké škály kapalin i plynů a par
- Obzvláště se hodí pro měření abrazivních, korozivních a silně znečištěných kapalin

Odporový průtokoměr (2)

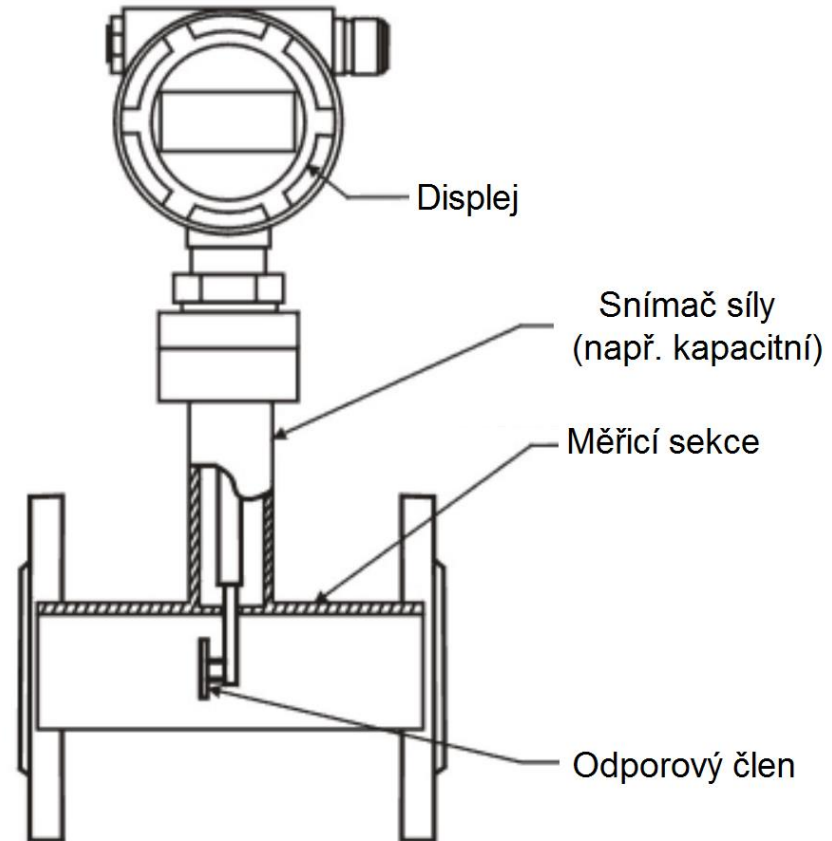
- Poměrně odolný s vysokou životností
- Nevýhodou je, že **musí být kalibrován na místě** pro danou tekutinu a dané podmínky
- Navíc má omezená kalibrační data (nutné provést kalibraci)
- Pro nastavení nuly, je nutné zcela zastavit proud tekutiny
- I když způsobuje malou tlakovou ztrátu v porovnání s clonovými průtokoměry, nelze se tlakové ztráty zcela zbavit

Odporový průtokoměr - Princip

$$F_o = \frac{1}{2} C_D \rho_{tek} v_{ref}^2 A_{ref}$$

$$U = K F_o$$

$$\dot{V} = C U$$



Odporový průtokoměr - Ukázka



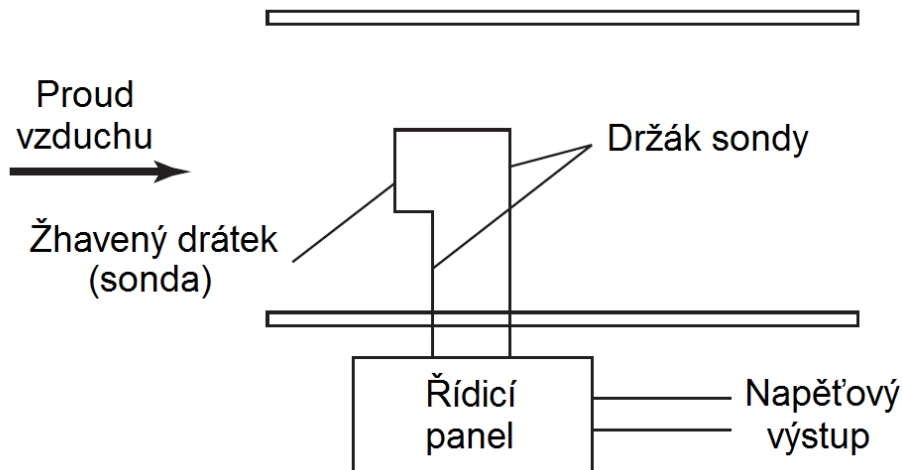
Hmotnostní průtokoměry

- Využívají principů termoanemometrie a kalorimetrie nebo zachování hmoty
- Typy tepelně-hmotnostních průtokoměrů:
 - 1) *Termoanemometrický průtokoměr (žhavený drátek)*
 - 2) *Tepelný hmotnostní (kalorimetrický) průtokoměr*
- Typy hmotnostních průtokoměrů:
 - 1) *Coriolisův průtokoměr*

Termoanemometrický průtokoměr

- Využívá principů termoanemometrie (viz metoda žhaveného drátku)
- V případě hmotnostního toku je nutné měřit spolu s rychlostí ještě hustotu média
- Průřez potrubí se zadává ručně nebo je již součástí vyhodnocovacího SW od výrobce

$$\dot{V} = vA$$
$$\dot{m} = \rho \dot{V}$$



Tepelný hmotnostní průtokoměr

- Využívá principů kalorimetrie
- Především využít pro měření hmotnostního toku čistých plynů, ale je možné i měření kapalin
- Princip založen na ohřevu tekutiny mezi dvěma místy
- Na základě znalosti **druhu tekutiny a dodaného množství tepla lze pak určit hmotnostní tok**
- **Bez mechanických pohyblivých částí**

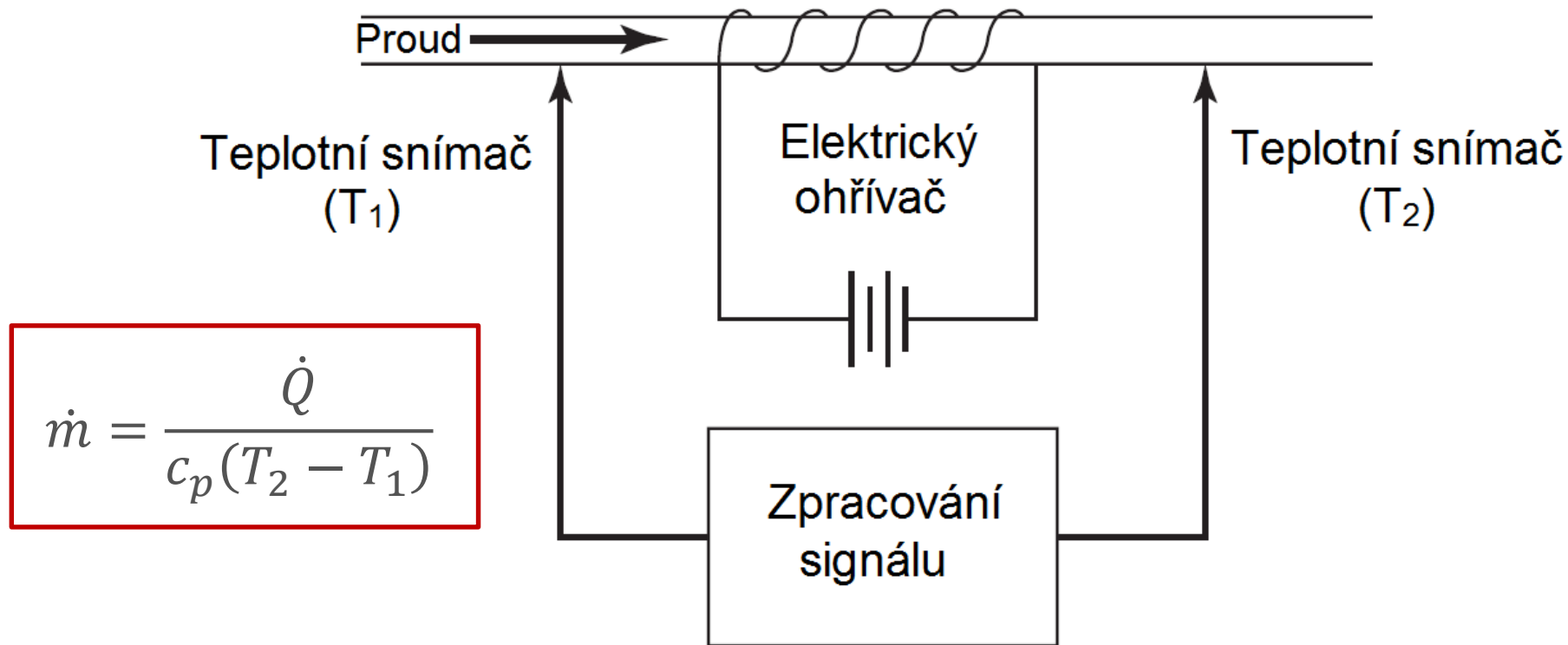
$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{c_p \Delta T}$$

Tepelný hmotnostní průtokoměr (2)

- Přesnost ($\pm 1-2 \%$)
- Jsou možné **2 režimy**:
 - a) *Konstantní tepelný tok a měří se rozdíl teplot*
 - b) *Konstantní rozdíl teplot a měří se tepelný tok*
- V praxi se často využívá dvou odporových snímačů teploty, které jsou zároveň topnými elementy
- Použití k ohřevu celého proudu tekutiny nebo pouze jeho části

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{c_p \Delta T}$$

Tepelný hmotnostní průtokoměr - Princip



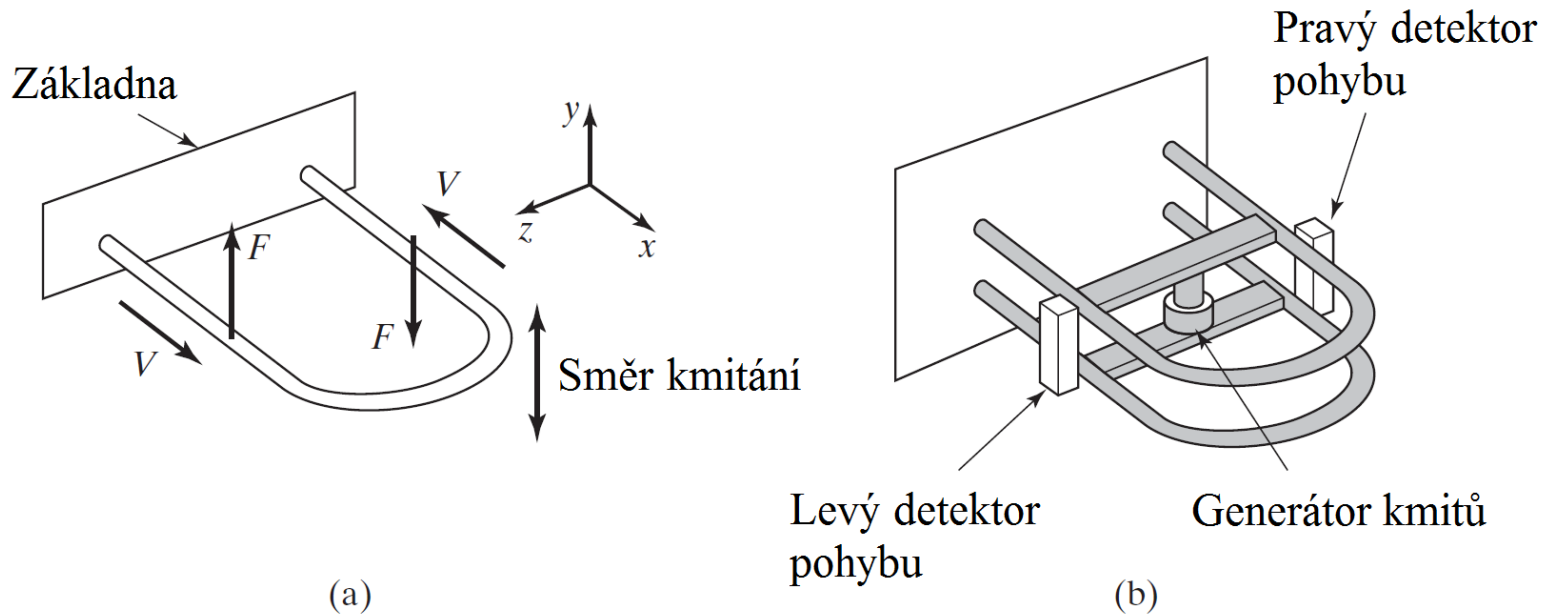
Tepelný hmotnostní průtokoměr - Ukázka



Coriolisův hmotnostní průtokoměr

- Využívá principů Coriolisova efektu, který vzniká v rotující soustavě
- Pro **měření hmotnostního toku a hustoty tekutin**
- Princip založen na rezonančním kmitání trubice, kterou protéká tekutina
- Vibrace slouží k navození rotující soustavy, ve které vzniká Coriolisova síla
- Velmi přesná metoda měření (± 0.1 – 0.2 %)
- Vhodný pro měření téměř všech druhů tekutin, včetně vícefázových
- Poměrně drahý přístroj (statisíce Kč)

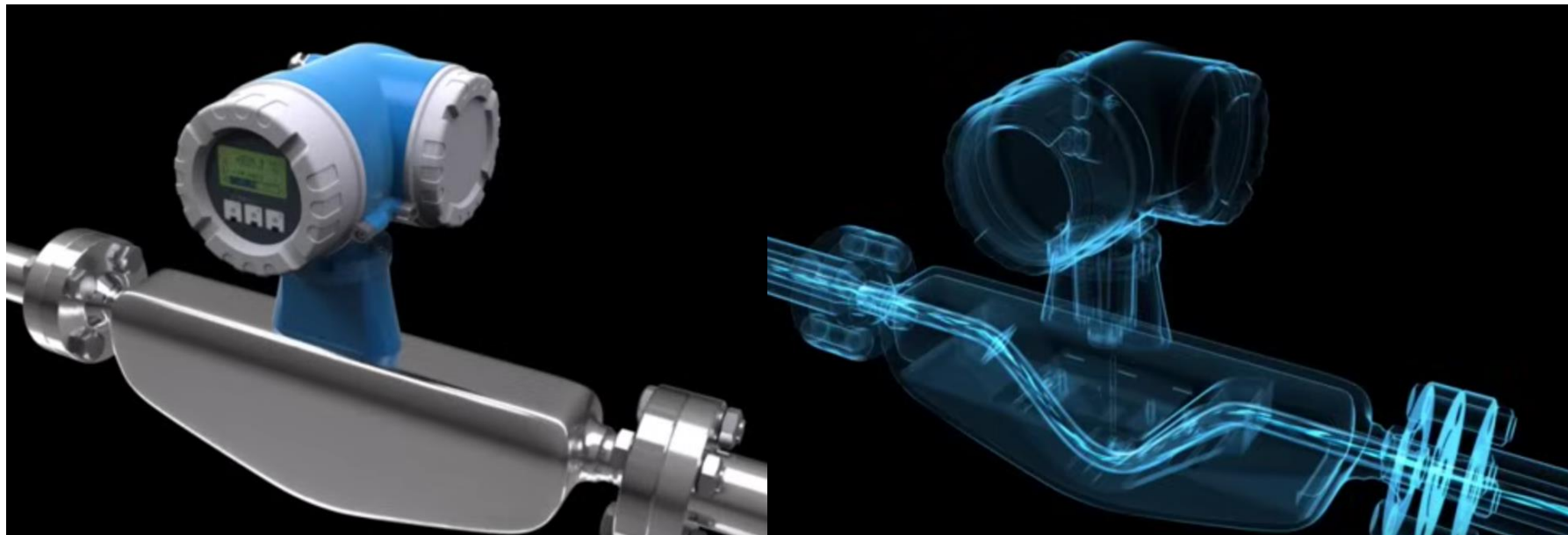
Coriolisův hmotnostní průtokoměr - Princip



Coriolisův hmotnostní průtokoměr - Ukázka



Coriolisův hmotnostní průtokoměr – Ukázka (2)





Děkuji za pozornost