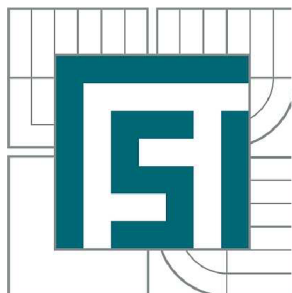


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

## MĚŘENÍ RYCHLOSTNÍCH PROFILŮ V KAPALINÁCH POMOVÍ UVP

MEASURING OF VELOCITY PROFILES IN LIQUIDS BY USING OF UVP

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAN KÁRNÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JAROSLAV ŠTIGLER, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2010/2011

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Jan Kárník

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Měření rychlostních profilů v kapalinách pomocí UVP**

v anglickém jazyce:

### **Measuring of Velocity Profiles in Liquids by Using of UVP**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

UVP (Ultrasound Velocity Profile) umožňuje měření rychlostních profilů v tekutinách. Výhodou metod založených na měření ultrazvukem je to, že není nutné do měřené oblasti "vidět". Zařízení, na kterém probíhá měření nemusí být vyrobeno z transparentních materiálů.

Cíle bakalářské práce:

Seznámit se s principem měření rychlostních profilů pomocí ultrazvuku. Porovnat tento princip s jinými metodami - PIV.

Zjistit možnosti a omezení při jeho využití. Provést zkušební měření na jednoduchém experimentálním zařízení

Seznam odborné  
literatury: Manuál  
UVP-Duo  
Monitor  
Internet

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jaroslav Štigler, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku  
2010/2011. V Brně, dne 10.11.2010

L.S.

---

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Následující bakalářská práce pojednává o jednom z možných způsobů určování rychlostních profilů v kapalinách. Obsah práce je zaměřen zejména na metodu UVP (Ultrasound Velocity Profile), na způsoby a principy měření, její klady a zápory a její srovnání s ostatními konvenčními metodami, jako například PIV (Particle Image Velocimetry) a LDA (Laser Doppler Anometry). V práci je dále popsáno možné uchycení převodníků k měřicí soustavě. Dále se práce zabývá problémy při zkušebním měření.

Úvodem se práce zabývá seznámením s principem a funkcí měřicího zařízení a se samotným zařízením pro metodu UVP.

Kromě metody UVP se pak práce zabývá stručným popisem konkurenčních měřicích metod – PIV a LDA, které jsou v současné době využívány k měření rychlostních profilů. Zvláštní pozornost je věnována metodě PIV, jejíž význam v současnosti stále roste.

Závěrem je provedeno porovnání jednotlivých měřicích metod s metodou UVP a zhodnocení kroků nutných pro úspěšné měření technikou UVP.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

měření, ultrazvuk, rychlostní profil, převodník, Laser Doppler Anometry – LDA, Particle Image Velocimetry – PIV, Ultrasound Velocity Profile – UVP,

## **ABSTRACT**

The following bachelor's thesis deals with one possible way of determination velocity profiles in liquids. Content of the thesis is focused mainly on the method of the UVP (Ultrasound Velocity Profile), on the ways and principles of measuring, on its pluses and cons and it's comparison with the other conventional methods, like for the example the PIV (Particle Image Velocimetry) and LDA (Laser Doppler Anemometry). There is also the possible placement of the transducers to the measuring system discussed. Furthermore the thesis deals with trouble in the test measurement.

At the beginning this work deals with familiarization with principle and function of the measuring device and with the device for the method UVP itself.

Apart from the UVP measuring method the thesis also deals with short description of the competitive methods – PIV, LDA, which are used to measure the velocity profiles nowadays.

Particular attention is given to the PIV method, which significance is currently growing.

In conclusion, there is comparison of different methods with the UVP method made and there are the future steps to realize the successful measurement with UVP method also discussed.

## **KEY WORDS**

measurement, ultrasound, velocity profile, transducer, Laser Doppler Anemometry – LDA, Particle Image Velocimetry – PIV, Ultrasound Velocity Profile – UVP,

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE PRÁCE**

KÁRNÍK, J. *Měření rychlostních profilů v kapalinách pomocí UVP*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 58 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jaroslav Štigler, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem svojí bakalářskou práci vypracoval samostatně a v příloženém seznamu jsem správně uvedl veškeré použité zdroje.

V Brně, 26.2 2011

---

Jan Kárník

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jaroslavu Štiglerovi, Ph.D za cenné rady a připomínky při tvorbě této práce.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Martinu Hudcovi za pomoc při přípravě měření a panu Janu Bauerovi a Bronislavu Kusému za přípravu měřicí tratě a zapůjčení laboratorních pomůcek.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b>	<b>11</b>
<b>1. ULTRAZVUKOVÉ MĚŘENÍ RYCHLOSTI - UVP</b>	<b>12</b>
<b>1.1 ULTRAZVUK – ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI</b>	<b>12</b>
1.1.1 RYCHLOST ZVUKU – TEORETICKÁ, SKUTEČNÁ	12
1.1.2 ODRAZ A LOM NA ROZHRAŇÍ	13
1.1.3 ABSORPCE	15
<b>1.2 PRINCIPY MĚŘENÍ</b>	<b>15</b>
<b>1.3 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ MĚŘENÍ</b>	<b>17</b>
1.3.1 ŠÍŘKA MĚŘICÍHO KANÁLU	17
1.3.2 MĚŘICÍ OKNO, VZDÁLENOST MĚŘICÍCH KANÁLŮ	19
1.3.3 MAXIMÁLNÍ MĚŘITELNÁ HLOUBKA	19
1.3.4 MAXIMÁLNÍ MĚŘITELNÝ RYCHLOSTNÍ ROZSAH	20
1.3.5 RYCHLOSTNÍ ROZLIŠENÍ	21
1.3.6 VYSOKOFREKVENČNÍ ZESÍLENÍ A EMISNÍ NAPĚTÍ UZ PAPERSKU	22
1.3.7 POČET OPAKOVÁNÍ, POČET CYKLŮ ZA PULZ A PŘEKRÝVÁNÍ	23
1.3.8 DOBA MĚŘENÍ	24
<b>1.4 ULTRAZVUKOVÉ PŘEVODNÍKY A JEJICH VLASTNOSTI</b>	<b>24</b>
1.4.1 POPIS JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ ULTRAZVUKOVÉHO PŘEVODNÍKU.	25
1.4.2 ZÁKLADNÍ TYPY PŘEVODNÍKŮ.	27
1.4.3 ZVUKOVÉ POLE GENEROVANÉ PŘEVODNÍKY.	31
<b>1.5 VÝHODY A VYUŽITÍ – UVP</b>	<b>33</b>
<b>2. PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY – PIV</b>	<b>34</b>
<b>2.1 METODA PIV - ÚVOD</b>	<b>34</b>
<b>2.2 ZÁKLADNÍ KOMPONENTY A POPIS PRÁCE</b>	<b>34</b>
2.2.1 POPIS PRÁCE ZAŘÍZENÍ PIV	35
2.2.2 PRINCIP VYHODNOCOVÁNÍ HODNOT	36
2.2.3 PRINCIP MĚŘENÍ 3D	37
<b>2.3 VÝHODY A PŘÍKLADY POUŽITÍ TECHNIKY PIV</b>	<b>38</b>
<b>3. LASER DOPPLER ANEMOMETRY – LDA</b>	<b>40</b>
<b>3.1 METODA LDA - ÚVOD</b>	<b>40</b>
<b>3.2 ZÁKLADNÍ KOMPONENTY</b>	<b>40</b>
<b>3.3 POPIS PRÁCE ZAŘÍZENÍ LDA</b>	<b>41</b>
<b>3.4 VÝHODY A PŘÍKLADY POUŽITÍ TECHNIKY LDA</b>	<b>43</b>
<b>4. ZKUŠEBNÍ MĚŘENÍ – UVP MONITOR</b>	<b>45</b>
<b>4.1 MĚŘICÍ TRAŤ</b>	<b>47</b>
<b>4.2 POSTUP MĚŘENÍ</b>	<b>47</b>

<b>5.</b>	<b><u>SROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH METOD</u></b>	<b><u>50</u></b>
<b>6.</b>	<b><u>ZÁVĚR</u></b>	<b><u>51</u></b>
<b>7.</b>	<b><u>POZNÁMKY</u></b>	<b><u>52</u></b>
<b>8.</b>	<b><u>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</u></b>	<b><u>55</u></b>
<b>9.</b>	<b><u>SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ</u></b>	<b><u>57</u></b>
<b>10.</b>	<b><u>SEZNAM PŘÍLOH</u></b>	<b><u>58</u></b>



## ÚVOD

Pro možnosti rozvoje technologií jsou naprostou nutností kvalitní měřicí a detekční metody. Kvalitní zmapování dějů, jež se odehrávají na místech, do kterých se lidské oko nemá šanci podívat, anebo nejsou lidským okem vůbec pozorovatelné, je klíčem k dalšímu rozvoji technického pokroku. Naštěstí si lidstvo umí v dané situaci poradit a přichází s jedinečnými metodami vizualizace a vyhodnocování těchto “pozoruhodných” dějů.

Zařízení používaná dříve byla především mechanická, a proto s jejich pomocí nebylo možno měřit rychlost dostatečně lokálně. Nynější moderní zařízení jako jsou UVP (Ultrasound Velocity Profile), PIV (Particle Image Velocimetry), LDA (Laser Doppler Anemometry) jsou schopna měřit rychlost jak lokálně tak i plošně a poskytují nám tudíž takřka dokonalý pohled do pro nás nedostupných míst, jako jsou například kolena potrubních systémů, proudění v okolí lopatek turbín a čerpadel, snímání chování rychlosti při obtékání těles v aerodynamických tunelech, mapování rychlostních polí v potrubních systémech, sledování průběhů rychlosti v okolí ventilů a trysek u automobilů apod.

Tyto moderní metody tedy napomáhají například ke zvýšení účinnosti daných lopatkových strojů. Užívají se k návrhu ideálních aerodynamických profilů v těch nejvíce Hi – tech aplikacích. Jako příklad lze uvést letectví a kosmonautiku, ve kterých by se bez metod PIV, LDA takřka nebylo možné dostat k dalším technologickým prvkům. Metoda LDA sama o sobě je už velice zaběhlou metodou. Používá se už více než 30 let. S její pomocí byly například zkoumány lopatky v motoru legendárního letounu Boeing 737 či prvky na raketoplánech NASA.

Tato práce má být zaměřena zejména na metodu využívající ultrazvuk. Ultrazvuk má široké využití zejména v oblasti defektoskopie. Zde je jeho využití naprosto nedocenitelné. Protože s rozvojem technologie je velice důležité rozvíjet také znalosti o haváriích materiálů a snažit se jim předcházet a moderní defektoskopická zařízení jsou schopna detekovat vznikající trhliny ať už na povrchu materiálu tak uvnitř materiálu. A proto je ultrazvuk pro dnešní materiálové inženýrství a celkově pro veškerý průmysl naprosto nezbytným pomocníkem. Mezi dalšími aplikacemi ultrazvuku je nutné uvést jeho roli v lékařství, kde například pomáhá při sledování vyvíjejícího se plodu v lůně matky, či při zjišťování porušených podkožních tkání.

Zde vidíme naprostý kontrast mezi užíváním jednotlivých metod lze je použít pro „hrubou“ práci, sledování proudění v hydraulických strojích, „špinavou“ práci v kanalizačních potrubích anebo na jemnou lékařskou práci. Toto je velice důležité poukazuje to na všestrannost užití a také na to, jak lidstvo za několik posledních desítek až stovek let neskutečně pokročilo.

# 1. ULTRAZVUKOVÉ MĚŘENÍ RYCHLOSTI - UVP

## 1.1 Ultrazvuk – základní vlastnosti

Protože je rychlost zvuku jedním z hlavních parametrů nutný pro chod zařízení UVP Monitor, popíšeme si základní vlastnosti rychlosti zvuku a její podstatu.

Ultrazvukem rozumíme mechanické kmity částic prostředí kolem rovnovážné klidové polohy. Frekvence těchto kmitů jsou vyšší než 20 kHz. Nejčastěji jde o podélné vlny, kdy částice kmitají přímočaře ve směru šíření vlny. Pro technické účely se nejčastěji užívají frekvence mezi 100 kHz a 50 MHz v závislosti na aplikaci.

Ačkoli se zvuk a ultrazvuk chovají velice podobně, ultrazvuk má o mnoho kratší vlnovou délku. To znamená, že vlnové charakteristiky jsou výraznější, a echo signál může být generován i velice malými částicemi.

Ultrazvukové vlny vytvářejí v médiu mechanické vibrace ve formě vln. Tyto vlny mohou být podélné a příčné. Podélné vlna je vlnou kompresní, ve které je směr pohybu částic média shodný se směrem šíření zvukové vlny. Příčné vlny jsou vlny pohybující se kolmo ke směru pohybu částic média. Vlnová délka je vyjádřena pomocí vztahu (1).

Vlny mohou být pohlceny, absorbovány médiem, odraženy nebo se mohou lámat na rozhraní dvou různých materiálů. Vlna také může změnit svůj vlnový mód – z podélné se může stát příčná.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

kde  $\lambda$  – vlnová délka [m]  
 $c$  – rychlost zvuku [m/s]  
 $f$  – frekvence zvuku [Hz]

### 1.1.1 Rychlost zvuku – teoretická, skutečná

Rychlost šíření ultrazvuku je závislá na mechanických vlastnostech prostředí. V podstatě je to důsledek stlačitelnosti kapaliny.

U čistých kapalin závisí na tlaku a hustotě prostředí. Zhušťování a zředování kmitajících částic probíhá adiabaticky. Teoretickou rychlost zvuku tedy lze vyjádřit vztahem (2), což je rychlost v neohraničeném prostředí:

$$c_{th} = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (2)$$

kde  $c_{th}$  – je teoretická rychlost zvuku [m/s]  
 $K$  – je modul objemové pružnosti kapaliny [Pa]  
 $\rho$  – hustota prostředí [kg/m<sup>3</sup>]

Modul objemové pružnosti je veličina závislá na tlaku a teplotě. S těmito závislostmi souvisí i závislost této veličiny na objemu. Tuto závislost lze vyjádřit za pomoci vztahu (3):

$$K = -V_0 \frac{\partial P}{\partial V_0} \quad (3)$$

kde  $p$  – tlak [Pa]  
 $V_0$  – objem [m<sup>3</sup>]

Vliv mechanických vlastností prostředí se nám do rychlosti projeví ve vlastnostech potrubí.

Vlastnosti potrubí zahrnuje součinitel  $k$ , který platí pro všechny materiály a je omezen pouze na kruhový průřez. Pro součinitel  $k$  platí vztah:

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{K \cdot D}{E \cdot S}}} \quad (4)$$

kde  $K$  – modul objemové pružnosti [Pa]  
 $D$  – vnitřní průměr potrubí [m]  
 $E$  – modul pružnosti v tahu pro potrubí [MPa]  
 $S$  – tloušťka stěny potrubí [m]

Pro skutečnou rychlost zvuku v ohraničeném prostředí pak platí:

$$c = k \cdot c_{th} \quad (5)$$

kde  $c$  – skutečná rychlost zvuku [m/s]

Ze vztahů (3) a (4) tedy vyplývá, že zvuk se může šířit pouze v médiu, které netlumí zvuk na tolik, že je signál zcela pohlcen.

Útlum zvukového signálu závisí na kinematické viskozitě kapaliny, objemové viskozitě, obsahu bublin a pevných částic v kapalině, usazeninách na stěně potrubí a na materiálu stěn potrubí.

### 1.1.2 Odraz a lom na rozhraní

Rozhraním je myšlena hranice mezi dvěma médii, které mají rozdílné akustické impedance.

Akustická impedance ( $Z$ ) je vyjádřena jako součin hustoty materiálu a rychlosti zvuku. Jedná se o materiálovou charakteristiku.

Odraz a lom na rozhraní pro zvukové vlny se řídí stejnými pravidly jako odraz a lom světla v optice. Schematické znázornění odrazu a lomu je popsáno na obrázku (Obr. 1.1). Vztahy mezi dopadající vlnou, odraženou vlnou a lomenou vlnou vychází z tlakové podstaty zvukového vlnění.

Rozeznáváme dva základní koeficienty:

Koeficient odrazu ( $R$ ):

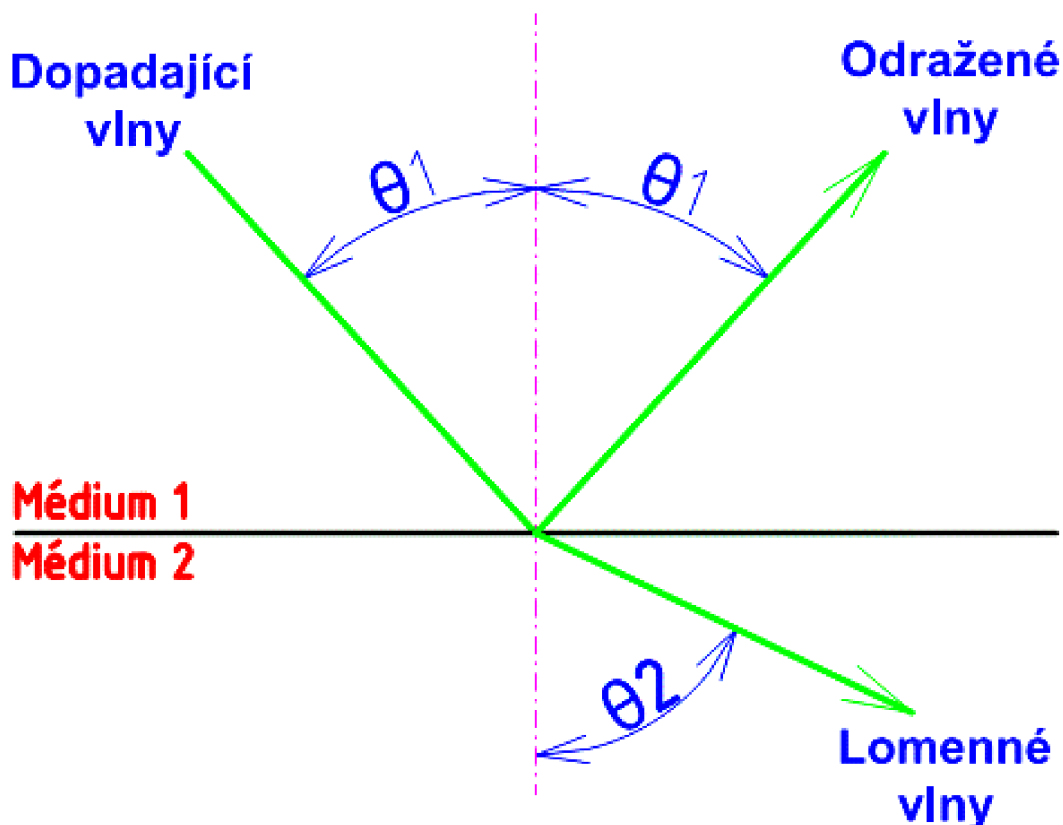
$$R = \frac{p_r}{p_i} = \frac{Z_2 \cdot \cos\theta - Z_1 \cdot \cos\theta_1}{Z_2 \cdot \cos\theta + Z_1 \cdot \cos\theta_1} \quad (6)$$

kde  $p_r$  – intenzita odražené vlny [Pa]  
 $p_i$  – intenzita dopadající vlny [Pa]  
 $Z$  – akustická impedance media [1]  
 $\theta$  – úhel dopadu ultrazvukové vlny vzhledem k normále [deg]

Koeficient prostupu (T)

$$T = \frac{p_t}{p_i} = 1 - R = \frac{2 \cdot Z_2 \cdot \cos \theta}{Z_2 \cdot \cos \theta + Z_1 \cdot \cos \theta_1} \quad (7)$$

kde  $p_t$  – intenzita prostupující vlny  
index 1 – pro médium 1  
index 2 – pro médium 2



Obr. 1.1 Schematické znázornění Fresnelova pravidla

Pokud neuvažujeme absorpci tak platí, že vlna, která se neodráží, tak prostupuje.  
Lom ultrazvuku se řídí Fresnelovým pravidlem

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{c_1}{c_2} \quad (8)$$

Pokud se úhel  $\theta_2 = 90^\circ$  bude celá dopadající vlna odražena a odpovídající úhel  $\theta_1$  se nazývá „kritický úhel“. Kritického úhlu lze dosáhnout nejčastěji při přechodu z média s nižší rychlostí zvuku do média s vyšší rychlostí zvuku. Velikost kritického úhlu je velice důležitou veličinou. Při úhlu dopadu blížícím se kritickému úhlu dochází k extrémnímu snížení koeficientu transmise. Hodnoty kritických úhlů pro vybrané kombinace materiálů jsou uvedeny v tabulce níže (Tab 1.1).

Při nízkých hodnotách kritického úhlu je vhodnější přivést sondu do přímého kontaktu s měřeným médiem (např. otvorem ve stěně potrubí).

**Tab. 1.1** Hodnoty kritického úhlu (měřeno od kolmice) pro vybrané kombinace medií. [1]

Medium 1	Medium 2	Rychlost zvuku $c_1$ [m/s]	Rychlost zvuku $c_2$ [m/s]	$\theta_{\text{kritický}}$ [°]
voda	Plexisklo	1 480	2 760	32.4
voda	Polyamid	1 480	2 400	38.0
teflon	Voda	1 350	1 480	65.8
voda	Ocel	1 480	5 900	14.5
voda	Hliník	1 480	6 320	13.5
voda	Mosaz	1 480	3 400	25.8
voda	Sklo	1 480	5 200	16.5
rtuť	Ocel	1 450	5 900	14.2
glycerol	Polyamid	1 920	2 400	53.1
voda	PVC	1 480	2 380	38.5

### 1.1.3 Absorpce

Energie se během šíření ultrazvukové vlny transformuje do jiných forem, anebo se ztrácí vlivem rozptylu na nečistotách obsažených v médiu.

Měřítkem absorpce je tzv. absorpční koeficient ( $\alpha$ ), tento koeficient závisí na materiálu, na frekvenci ultrazvukového vlnění, teplotě a dalších parametrech.

Pro měření zařízením UVP Monitor je důležité zvolit vhodný materiál potrubí. Vhodným materiálem je myšlen materiál s nízkým absorpčním koeficientem.

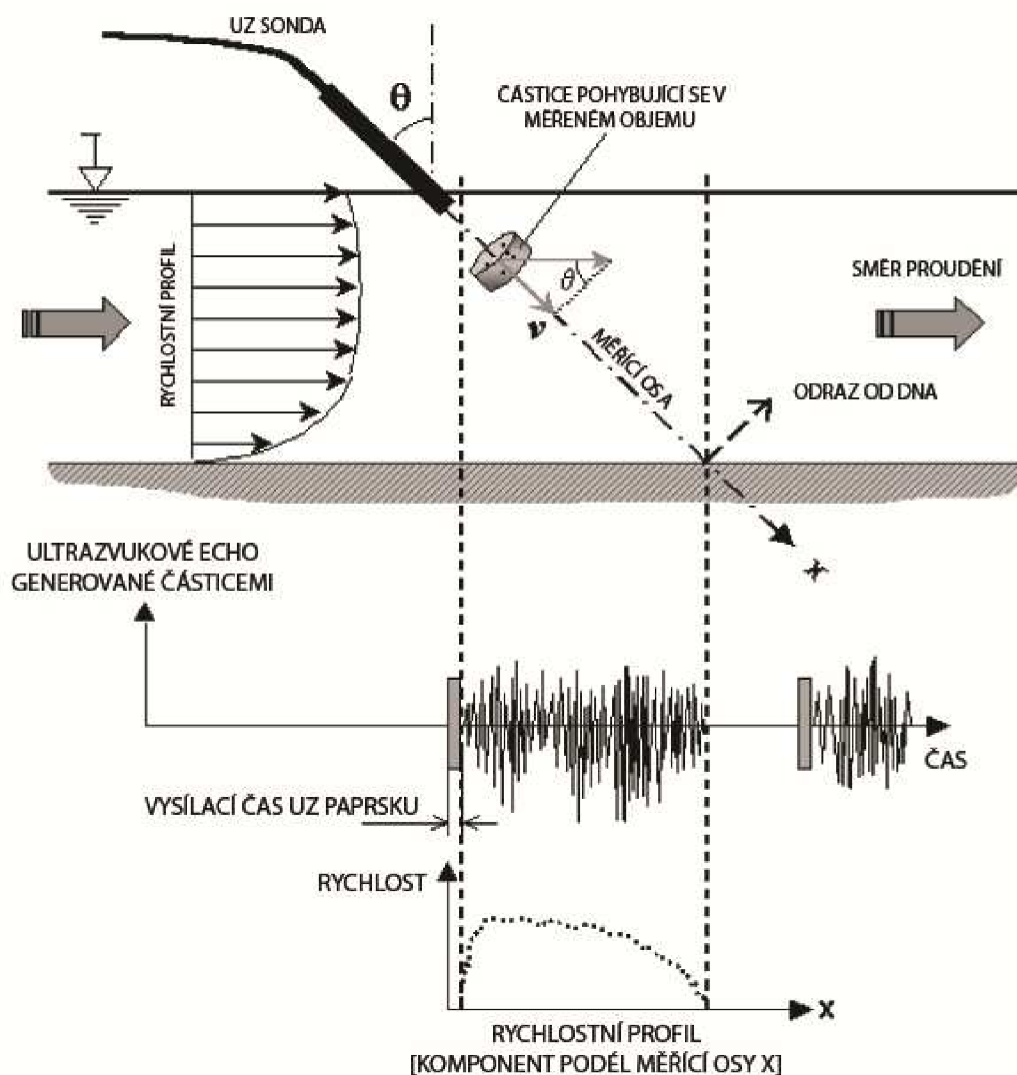
## 1.2 Principy měření

Měření může probíhat jak metodou přímou, snímač ultrazvuku je umístěn přímo do proudu, tak metodou nepřímou, kdy je snímač umístěn mimo samotný proud kapaliny. Například při měření potrubí lze sondu umístit na vnější část potrubí nebo jí ponořit přímo do kapaliny.

Princip funkce si popíšeme na příkladu proudění s volnou hladinou (Obr. 1.2).

Ultrazvukový převodník vyšle krátký ultrazvukový signál podél své měřicí osy  $L_m$ . Poté se přepíná do režimu přijímače. Tento signál „putuje“ kapalinou a naráží na malé částice rozptýlené v dané kapalině. Při každém nárazu se část energie ultrazvukového paprsku rozptyluje a část se odráží zpět. Tento odražený paprsek se nám vrací k převodníku s určitým časovým zpožděním. Celý tento děj si lze představit jako prostou zvukovou ozvěnu, při které zavoláme do prostoru, zvuk se šíří jako vlnění. Zvuková ozvěna se nám vrací se zpožděním jako odraz vlnění od překážek ve směru jejího šíření.

Jestliže se ultrazvukový paprsek odráží od částice s nenulovým průmětem vektoru rychlosti do měřicí (akustické) osy převodníku  $L_m$ , dochází k dopplerovskému posuvu ultrazvukové frekvence. V důsledku tohoto děje bude frekvence přijímaného signálu „dopplerovsky posunuta“.



Obr. 1.2 Schematické znázornění měření proudění s volnou hladinou za pomoci UVP [2]

Princip činnosti UVP Monitoru je tedy úzce spojený se schopností změřit časový posuv  $t$  a dopplerovský posuv  $f_d$ . Při úspěšném měření jsme tedy schopni určit jak časový, tak dopplerovský posuv. Tudíž je možné určit jak polohu, tak i rychlost určité částice.

Protože ve skutečnosti měříme rychlost odrazných částic rozptýlených v kapalině a ne rychlost samotné kapaliny, musí být částice dostatečně malé, aby byly schopny kopírovat proudění kapaliny. Po splnění této podmínky předpokládáme, že měříme přímo rychlost kapaliny a že UVP Monitor je schopný určit jednu ze složek vektoru rychlosti v daném bodě.

Pro názornost uvádíme vztahy pro časový a dopplerovský posuv:

Časová prodleva:

$$t = \frac{2x}{c} \quad (8)$$

- kde  $t$  – časová prodleva mezi vyslaným a přijatým signálem [s]  
 $x$  – vzdálenost převodníku a dané rozptylující částice [m]  
 $c$  – rychlost zvuku v kapalině [m/s]

Dopplerův posuv:

$$v = \frac{f_d c}{2f_0} = f_d \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (9)$$

kde  $v$  – průmět vektoru rychlosti do akustické osy převodníku [m/s]  
 $c$  – rychlost zvuku v kapalině [m/s]  
 $f_d$  – dopplerovská frekvence [Hz]  
 $f_c$  – vysílací frekvence [Hz]  
 $\lambda$  – vlnová délka ultrazvuku v mediu [m]

Jednou ze základních schopností UVP Monitoru je tedy možnost určit rychlosti v mnoha rozdílných bodech podél akustické měřicí osy převodníku.

### 1.3 Faktory ovlivňující měření

Měření rychlostního profilu za pomoci UVP sebou nese určitá omezení plynoucí až už z vlastní geometrie měřicí soustavy, tak i z vlastností samotného ultrazvukového paprsku.

Vlastnostem ultrazvukového paprsku se věnuje kapitola 1.1. V této kapitole se budeme věnovat faktorům, které lze více či méně ovlivnit až už zásahem do geometrického uspořádání převodníků nebo za pomoci softwarových nastavení.

#### 1.3.1 Šířka měřicího kanálu

Jedná se o prostorově lokalizovanou plochu (šířku) v měřeném objemu, ve které je zařízení UVP schopno provést měření rychlostního profilu. V dané šířce měřicího kanálu je pak měření považováno za diskrétní.

Šířku měřicího kanálu lze popsat následujícím vztahem:

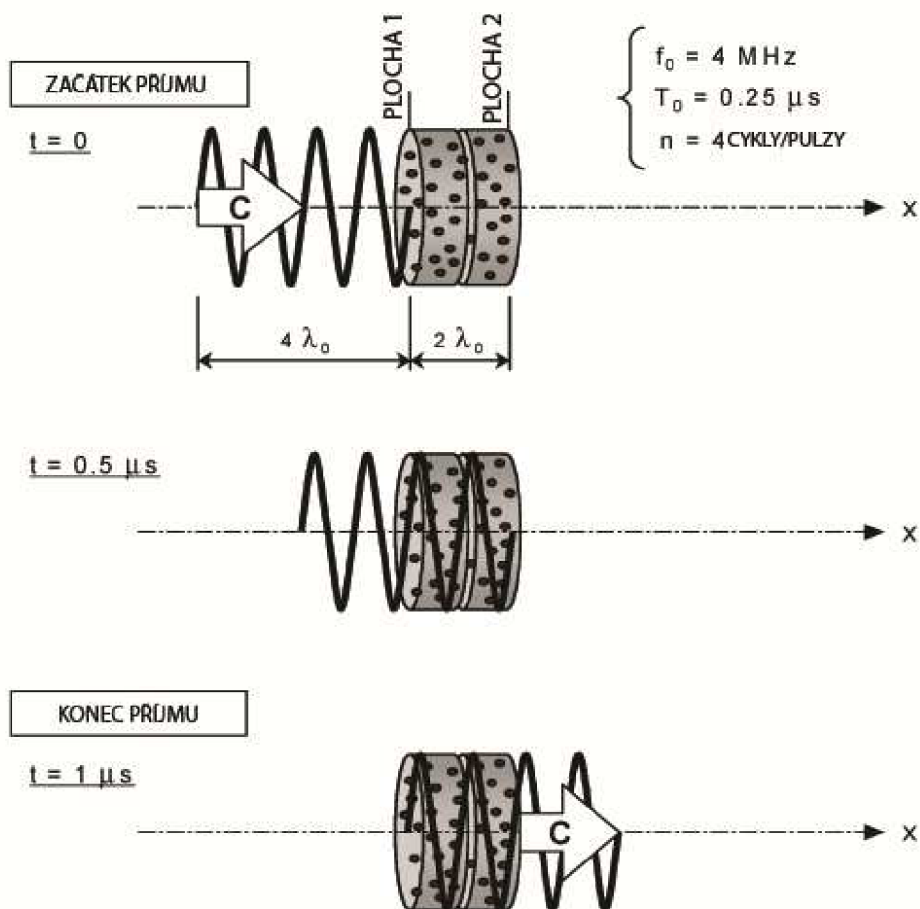
$$w = c \cdot \frac{n}{2f_0} = n \cdot \frac{\lambda_0}{2} \quad (10)$$

kde  $w$  – šířka měřicího kanálu [m]  
 $c$  – rychlost zvuku v kapalině [m/s]  
 $n$  – počet ultrazvukových cyklů v pulzu [-]  
 $f_0$  – vysílací frekvence [Hz]  
 $\lambda_0$  – vlnová délka ultrazvuku v mediu [m]

Ze vzorce uvedeného výše nám vyplývá, že celková šířka měřicího kanálu je přímo úměrná poloviční vlnové délce ultrazvuku v mediu. Proč je šířka měřicího kanálu rovna pouze polovině a ne celé vlnové délce, si osvětlíme dále. V praxi znamená dvojka ve jmenovateli rozdíl vzdáleností mezi počátkem měřicího kanálu a jeho koncem. Pulz musí urazit dvojnásobnou vzdálenost od bodu, kdy dosáhl počátečního bodu měřeného kanálu do koncového bodu měřeného kanálu.

Situace je popsána na následujícím obrázku (Obr. 1.3). Na obrázku je zobrazen řez měřicího kanálu o velikosti dvou vlnových délek, do kterého vstupuje ultrazvuková vlna o velikosti čtyř vlnových délek. Převodník je umístěn přímo u stěny 1. Situaci na obrázku si popíšeme v časech  $t = 0$  s,  $t = 0,5\mu\text{s}$  a  $t = 1\mu\text{s}$ . Přepínací čas převodníku, tedy čas mezi

tím než se režim převodníku změní z vysílače na přijímač, je za těchto podmínek zanedbatelný.



Obr. 1.3 Řez měřicím kanálem [3]

Převodník vysílá ultrazvukový pulz. Přepíná se do režimu poslechu.

V čase  $t = 0$  s začátek ultrazvukového pulzu dorazí na přední část kontrolního objemu (plocha 1). Nejbližší odrazné částice v kontrolním objemu začínají generovat echo. Odražený signál dorazí prakticky bez zpoždění na převodník. Ultrazvuková vlna se ale šíří dál kontrolním objemem a narazí na další částice, které také odráží pulz nazpět, tyto odražené signály dorazí na převodník se stále rostoucím zpožděním.

V čase  $t = 0,5 \mu s$  dosahuje ultrazvukový pulz zadní strany kontrolního objemu (plocha 2). Nejdálčenější částice generují echo. Tento odražený signál dorazí na převodník o  $t = 0,5 \mu s$  později než echo z nejbližších částic na ploše 1.

V čase  $t = 1 \mu s$ , dosáhne konec pulzu plochy 1 a částice v okolí plochy 1 přestávají generovat echo, zatímco echo od částic v okolí plochy 2 právě dorazilo do převodníku. Ultrazvukový pulz se šíří dál, až za měřicí kanál a částice za měřeným kontrolním objemem stále vysílají echo zpět k převodníku. Převodník se ovšem vypíná právě v okamžiku, kdy do něj dorazí odraz z částic v okolí plochy 2. V důsledku toho lze diskrétně změřit zadaný kontrolní objem, aniž by byl ovlivněn echem z částic za hranicí tohoto objemu.



Příjem signálu tedy trval čtyři periody  $T_0$ . Naproti tomu echo od částic putovalo pouze dvě periody  $T_0$ . V podmínkách uzpůsobených pro dobrý signál se minimální šířka kanálu pro vodu rovná 0,74 mm. Za předpokladu následujícího nastavení veličin, počet cyklů v pulzu  $N_{rep} = 4$ , vysílací frekvence  $f_0 = 4$  MHz, rychlost zvuku ve vodě  $c = 1480$  m/s. Vliv těchto veličin bude popsán dále.

Šířka měřicího kanálu je určujícím parametrem pro prostorové rozlišení přístroje.

### 1.3.2 Měřicí okno, vzdálenost měřicích kanálů

Vzdáleností mezi dvěma měřicími kanály rozumíme nejmenší vzdálenost mezi středy dvou sousedících měřených objemů. Vzdálenost měřicích kanálů zůstává v celém měřicím okně konstantní.

Měřicím oknem rozumíme vzdálenost od středu počátečního kanálu po střed koncového kanálu  $N_{ch}$ . Počet měřicích kanálů lze volit z rozsahu 10 až 2048. Vztah pro šířku měřicího okna lze pak formulovat následujícím způsobem:

$$w = (N_{ch} - 1) * \text{vzdálenost kanálů} \quad (11)$$

kde  $w$  – délka měřicího okna [mm]  
 $N_{ch}$  – počet měřených kanálů

Důležité je si uvědomit, jak je definován konec měřicího okna. Konec měřicího okna je definován jako začátek měřicího okna  $W_{start}$  plus velikost měřicího okna  $W$ .

Konec měřicího okna musí být menší než maximální měřitelná hloubka  $P_{max}$ .

$$W_{end} = W_{start} + W = W_{start} + (N_{ch} - 1) * \text{vzdálenost kanálů} \quad [12]$$

$$W_{end} = P_{max} - 2 * \text{vzdálenost kanálů}$$

Hodnota polohy konce měřicího okna  $W_{end}$  tedy závisí na hodnotách maximální měřitelné hloubky  $P_{max}$ , hodnoty začátku měřicího okna  $W_{start}$  a počtu měřicích kanálů  $N_{ch}$ .

### 1.3.3 Maximální měřitelná hloubka

Maximální měřitelná hloubka je závislost rychlosti zvuku v daném prostředí a opakovací frekvence pulzů  $F_{prf}$ .

Závislost (12) nám vlastně vyjadřuje to, že není možné vyslat nový ultrazvukový pulz do kapaliny před tím, než se předchozí pulz vrátí z maximální měřitelné hloubky.

Maximální měřitelná hloubka je vlastně vzdálenost nejvzdálenějšího měřicího kanálu.

$$P_{max} = \frac{c}{F_{prf}} \quad (12)$$

kde  $P_{max}$  – maximální měřitelná hloubka [m]  
 $c$  – rychlost zvuku [m/s]  
 $F_{prf}$  – opakovací frekvence pulzů [1/s]

Ze vzorce (12) vyplývá, že s rostoucí opakovací frekvencí pulzů nám klesá maximální měřitelná hloubka.

Je tedy velice důležité, aby byla sonda vzhledem k hladině měřeného média umístěna pod úhlem jiným než 90°. Potřebujeme totiž, aby alespoň jeden z průmětů vektoru rychlosti, padl do akustické osy převodníku.

### 1.3.4 Maximální měřitelný rychlostní rozsah

Maximální měřitelný rychlostní rozsah vychází Nyquistova vzorkovacího teorému. Ten je závislý na  $F_{prf}$  (opakovací frekvence pulzů). Tato závislost nám určuje omezení hodnot rychlosti. Pro určité hodnoty  $F_{prf}$  tedy lze dostat určitý rychlostní rozsah. Výše zmiňovaná závislost je popsána vzorcem (13):

$$v_{rozsah} = \frac{c \cdot F_{prf}}{2 \cdot f_0} \quad (13)$$

kde  $v_{rozsah}$  – maximální měřitelný rozsah, maximální měřitelná složka rychlosti [m/s]  
 $f_0$  – základní ultrazvuková frekvence [Hz]  
 $F_{prf}$  – opakovací frekvence pulzů [1/s]  
 $c$  – rychlost zvuku [m/s]

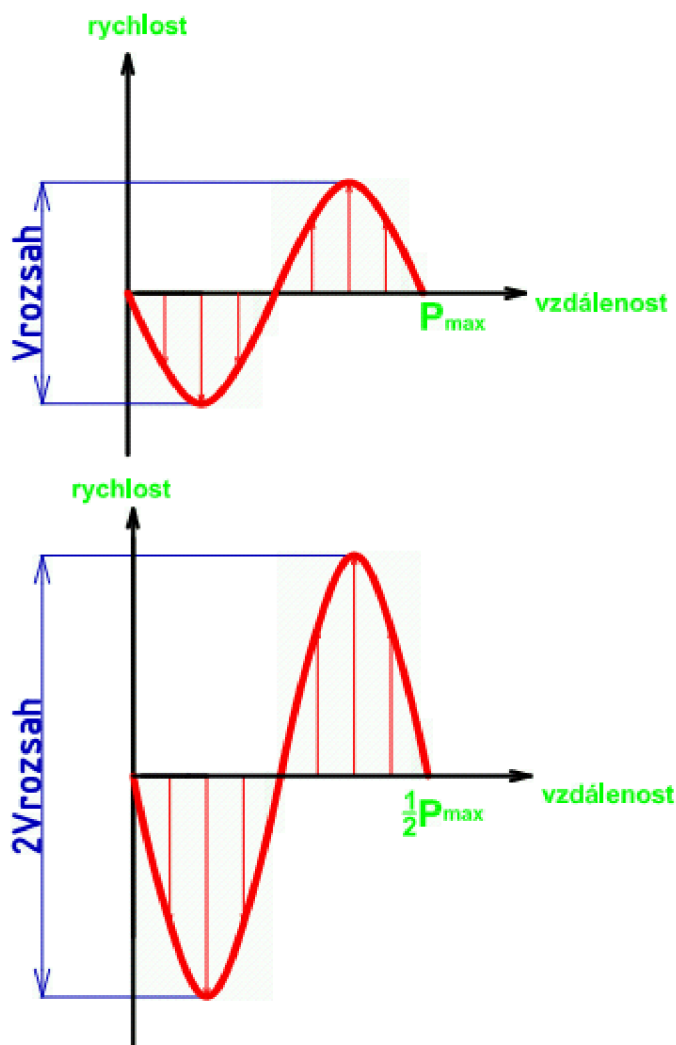
Úpravou vzorce (13) získáme vztah označený jako (14). Z něj nám plyne, že musíme při nastavování parametrů měření uvažovat kompromis mezi maximální měřitelnou hloubkou a maximálním měřitelným rychlostním rozsahem.

$$P_{max} \cdot v_{rozsah} = \frac{c^2}{4 \cdot f_0} \quad (14)$$

kde  $P_{max}$  – maximální změřitelná hloubka [m]  
 $v_{rozsah}$  – maximální měřitelný rozsah, maximální měřitelná složka rychlosti [m/s]  
 $f_0$  – základní ultrazvuková frekvence [Hz]  
 $c$  – rychlost zvuku [m/s]

Ze vztahu (14) je vidět, že měřené hodnoty lze ovlivnit změnou základní ultrazvukové frekvence  $f_0$ . Čím vyšší je frekvence  $f_0$ , tím lze dosáhnout nižší rychlosti nižšího dosahu a naopak. Samozřejmě že při nižším rychlostním rozsahu je zvýšeno prostorové rozlišení a naopak.

Na obrázku níže (Obr. 1.4) lze vidět schematicky vztah mezi maximální měřitelnou hloubkou a rychlostí.



Obr. 1.4 Maximální měřitelná hloubka v závislosti na rozsahu měřitelné rychlosti

### 1.3.5 Rychlostní rozlišení

Rychlostní rozlišení představuje nejmenší možnou rozlišitelnou diferenci v rychlosti. Ze vzorce (15) je vidět, že pokud chceme docílit vyššího rychlostního rozlišení, rychlostní rozsah  $v_{\text{rozsah}}$  se musí zmenšit. Protože hodnoty rychlostního rozsahu úzce souvisejí s maximální měřitelnou hloubkou  $P_{\text{max}}$ , je nutné, aby se maximální měřitelná hloubka zvětšila. To nám dokazuje vzorec (14).

$$\Delta v = \frac{v_{\text{rozsah}}}{256} \quad (15)$$

kde  $\Delta v$  – rychlostní rozlišení [m/s]  
 $v_{\text{rozsah}}$  – měřitelný rychlostní rozsah

Číslo 256 ve jmenovateli představuje počet rychlostních hodnot, které zpracuje 8 – bitový procesor v zařízení UVP Monitor. Jinak řečeno zařízení UVP není schopné zpracovat více rychlostních hodnot než je počet možných bitových kombinací.

Ze vztahů (14) a (15) je tedy vidět, jak úzce jsou spojeny hodnoty rychlostního rozsahu a rozlišení s hodnotami maximální měřitelné hloubky a opakovací frekvence pulzů. Klíčem k úspěšnému měření je tedy nalézt ideální kombinaci těchto hodnot.

Hodnoty, které zadáváme do ovládacího software zařízení UVP Monitor, jsou automaticky přepočítávány. Takže pokud zadáte například hodnotu  $v_{\text{rozsah}}$  software automaticky dopočítá hodnoty  $P_{\text{max}}$ .

V tabulce Tab. 1.2 jsou pro dané typy převodníků ( $f_0$ ) teoretické hodnoty maximální měřitelné hloubky ( $P_{\text{max}}$ ) rychlostního rozsahu ( $v_{\text{rozsah}}$ ) a rychlostního rozlišení ( $\Delta v$ ), tabulka je sestavena pro rychlost zvuku  $c = 1\,480$  m/s.

Jak je již zmíněno výše, hodnoty v tabulce jsou pouze teoretické, při praktickém měření jsou hodnoty ovlivňovány jinými vlivy (například pro maximální měřitelnou vzdálenost může být limitujícím faktorem absorpce).

**Tab. 1.2** Teoretické hodnoty rychlostního rozsahu, rozlišení a maximální měřitelné vzdálenosti.

$f_0$ [MHz]	$P_{\text{max}}$ [mm]	$v_{\text{rozsah}}$ [mm/s]	$v_{\text{max}}$ [mm/s]	$\Delta v$ [mm/s]	$c = 1480$ m/s
0.5	100	10 952	-	42.78	
	750	1 460	-	5.70	
1	100	5 476	2.632	21.39	
	750	730	362	2.85	
2	100	2 738	1 316	10.70	
	750	365	181	1.43	
4	100	685	658	5.35	
	750	183	91	0.71	
8	100	685	.	2.68	
	750	91	.	0.36	

### 1.3.6 Vysokofrekvenční zesílení a emisní napětí UZ paprsku

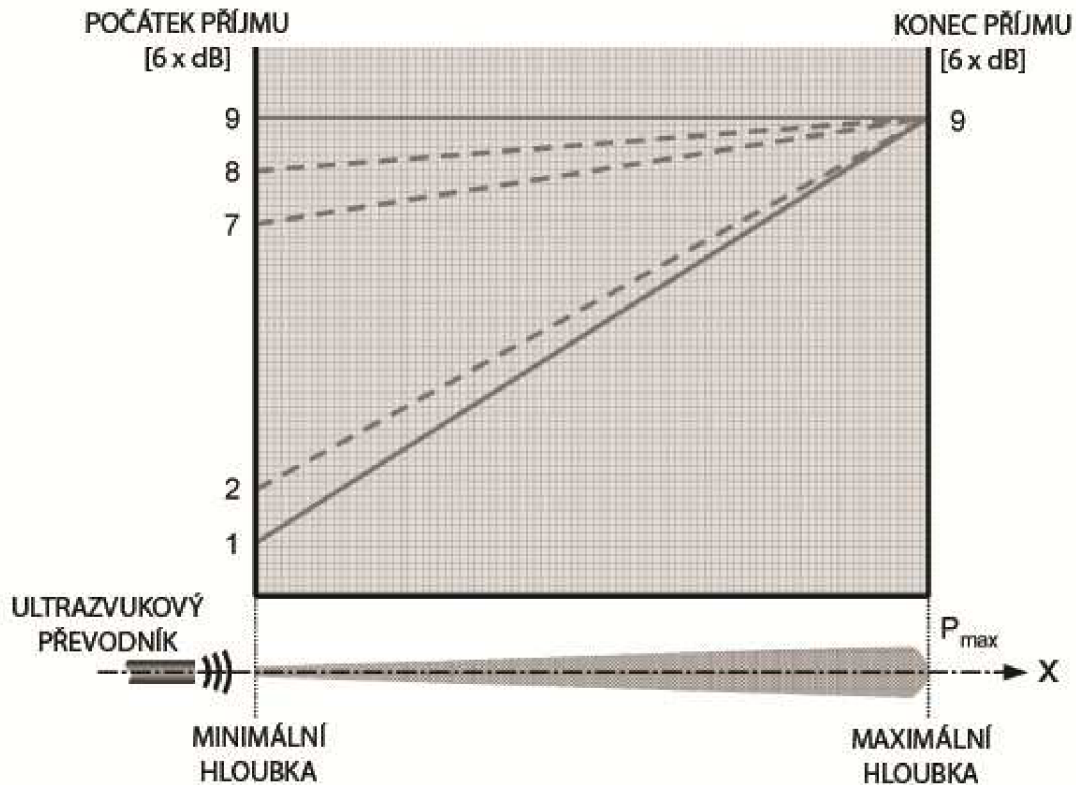
Jak již bylo vysvětleno dříve, paprsek, který se šíří kapalinou, ztrácí na své „síle“ vlivem absorpce a odrazů od částic, které se vyskytují v objemu dřívě. To znamená, že vzdálenější částice nám poskytují slabší odezvu než částice blíže k převodníku.

Proto je nutné echo ze vzdálenějších částic zesílovat. Zesílení je přímo úměrné času šíření ultrazvukového paprsku a nepřímo úměrné vzdálenosti částice.

V možnostech nastavení software zařízení UVP Monitor lze volit faktor zesílení od 1 do 9. Nastavujeme hodnotu zesílení na počátku zisku echo signálu a při koncové hodnotě zisku signálu. Vše je názorněji ukázáno na obrázku (Obr. 1.5). Faktor 1 je ekvivalentní zesílení 6dB.

Jak je vidět z obrázku (Obr. 1.5), nastavením faktoru zesílení vlastně měníme sklon úsečky, na které je rozloženo zesílení získávaného signálu. Pokud jsou startovací hodnoty a koncové hodnoty nastaveny na stejné hodnoty, v našem případě 9 – 9, je závislost konstantní.

## ROZDĚLENÍ ZESÍLENÍ ECHO SIGNALU



Obr. 1.5 Rozložení zisku signálu zesilovače v závislosti na měřené vzdálenosti [4]

Z obrázku lze vidět, že se rozložení zesílení signálu mění kontinuálně, bez skoků. To patří mezi hlavní výhody zařízení UVP. Nezaznamenáváme tak na výstupních grafech žádné skokové hodnoty vlivem „umělého“ zesílení signálu.

Hodnotu celkového zesílení můžeme ovlivnit i změnou síly vysílané ultrazvukové vlny. Tato úprava zesílení může být provedena změnou napětí vstupujícího do převodníku. Nejpoužívanější hodnoty napětí jsou 90 V a 150 V. Změnu napětí provádíme v závislosti na typu kapaliny, počtu reflexních částic, měřicí hloubce, síle stěny apod.

### 1.3.7 Počet opakování, počet cyklů za pulz a překrývání

Nastavení těchto hodnot závisí na vlastnostech měřené kapaliny. Hlavním ukazatelem toho, jak je kapalina vhodná pro měření pomocí zařízení UVP Monitor, je množství reflexních částic v ní obsažených.

V ovládacím software nastavujeme hodnoty počtu opakování  $N_{rep}$  (Number of repetitions) a počet cyklů za pulz (number of cycles in a pulse). Pokud je koncentrace reflexních částic malá, lze tyto hodnoty zvýšit ze základních hodnot  $N_{rep} = 32$  a Cycles per pulse = 4. Je zde ovšem zase určité omezení. Časové rozlišení (viz kapitola 1.3.8) nebo prostorové rozlišení je sníženo.

Z provedených měření bylo zjištěno, že při zvýšení těchto hodnot pro danou měřicí trať došlo k vyhlazení celkových průběhů rychlostních profilů a ke zmenšení výkyvů v naměřených rychlostech v daných vzdálenostech od převodníku.

Při zvyšování hodnot  $N_{rep}$  a Cycles per pulse může dojít k tzv. překrývání (overlapping). Tento jev souvisí s šířkou měřicího kanálu a také s vzdáleností kanálů. Je-li hodnota vzdálenosti kanálu příliš malá a hodnota šířky kanálu příliš velká, dojde k překrývání. Tomuto jevu je lepší se vyhnout. Dochází ke zkreslení výsledků měření.

Jedná se o poměrně složitý jev, při kterém dochází k překrytí generovaných echo signálů od kanálu bližšího k převodníku a od kanálu vzdálenějšího od převodníku.

### 1.3.8 Doba měření

#### Měřicí čas:

Je vlastně minimální časový interval mezi měřenými profily. Tento čas je rovný časovému rozlišení. Měřicí čas je závislý na počtu opakování  $N_{rep}$ . Čím vyšší je počet opakování, tím déle bude trvat měření kompletního profilu. Vztah mezi  $N_{rep}$  a měřicím časem  $T_{měření}$ :

$$T_{měření} = \Delta T = \frac{N_{rep}}{F_{prf}} \quad (16)$$

kde  $N_{rep}$  – počet opakování  
 $F_{prf}$  – opakovací frekvence pulzů [1/s]  
 $\Delta T$  – časové rozlišení [s]

#### Doba odběru vzorků:

Zjednodušeně řečeno je to vlastně celková doba měření. Lze ji nastavovat od určité minimální hodnoty. Minimální hodnota závisí na parametrech popsanych v předchozích kapitolách. Nastavit lze tedy jakoukoli měřicí periodu, která je větší než minimální hodnota. Omezením měřicí periody lze snížit celkovou dobu měření, zmenšit velikost souboru s naměřenými daty.

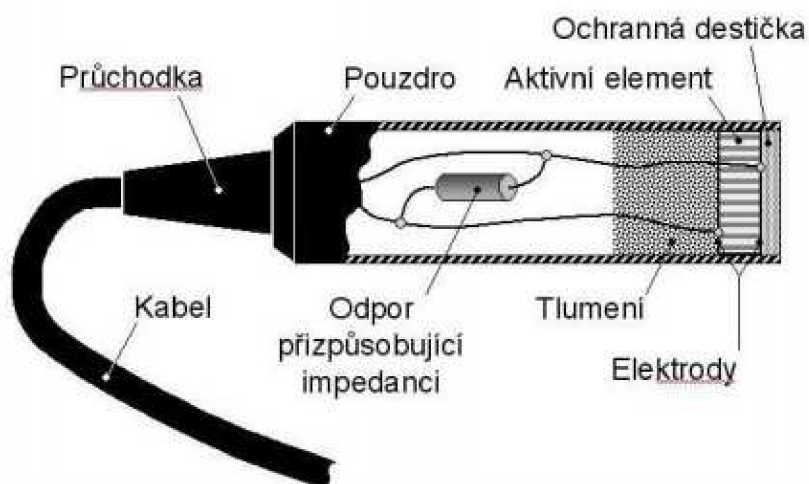
## 1.4 Ultrazvukové převodníky a jejich vlastnosti

Ultrazvukovým převodníkem rozumíme zařízení, které je schopno převádět elektrický signál do mechanické odezvy a naopak. Vysokofrekvenční elektrický signál je na aktivní části převodníku převeden na vysokofrekvenční ultrazvukový signál, což je vlastně vysokofrekvenční mechanické vlnění. Převodník tedy pracuje jako jakýsi generátor ultrazvukových vln. Pokud je děj opačný, mechanické vlnění dorazí na aktivní část převodníku a převodník generuje elektrický signál. Elektrický signál je svou silou úměrný mechanickému vlnění. Převodník pracuje jako přijímač ultrazvukových vln.

Převodníky, které využívá zařízení UVP Monitor, musejí být velice agilní. Je totiž velice nutné, aby se byly schopny přepnout z módu generátoru do módu přijímače.

Generované vlny procházejí médii, jež obklopuje aktivní část převodníku. Šíření vlny médii je možné díky elastickým vlastnostem prostředí, kterým se vlna šíří. Šíření vlnění bylo popisováno v kapitole 1.1. Elastickým médii může být pevná látka či kapalina.

Na obrázku (Obr. 1.6) jsou popsány základní části převodníku. Mezi všemi částmi převodníku jsou čtyři části nezbytné pro požadovanou činnost převodníku, kterou je vysílání ultrazvukového signálu a příjem „ozvěny“ ultrazvukového vlnění. Tyto čtyři části jsou: aktivní element, tlumení, elektrody a ochranná deska.



Obr. 1.6 Schéma ultrazvukového převodníku [5]

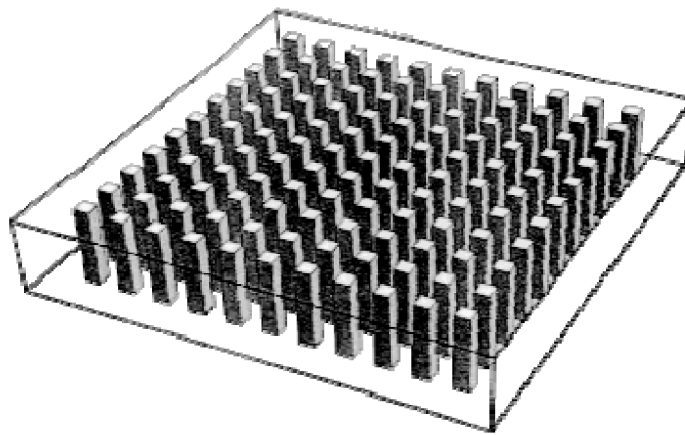
#### 1.4.1 Popis jednotlivých částí ultrazvukového převodníku.

Jak již bylo řečeno, mezi čtyři nejdůležitější části převodníku patří: ochranná deska, aktivní element, elektrody a tlumení.

Všechny tyto součásti přichází do přímého kontaktu s ultrazvukovým vlněním, prvky slouží ke generaci a příjmu ultrazvukových vln. Vlnění rovněž těmito prvky prochází, proto je velice žádoucí, aby byly tyto části vyrobeny z vhodného materiálu. Takovým materiálem rozumíme materiál, který je akusticky impedančně uzpůsobený pro jejich funkci. V kapitole 1.1 je popsáno šíření ultrazvukových vln a jejich závislost na akustické impedanci. Proto se zde nyní odkazují na tuto kapitolu a nebudu zde řešit šíření vlnění převodníkem. Pokud bychom impedančně nepřizpůsobili tyto součásti, docházelo by v průběhu generace a příjmu vlnění k velkým ztrátám a měření by nebylo korektní.

##### Aktivní část převodníku

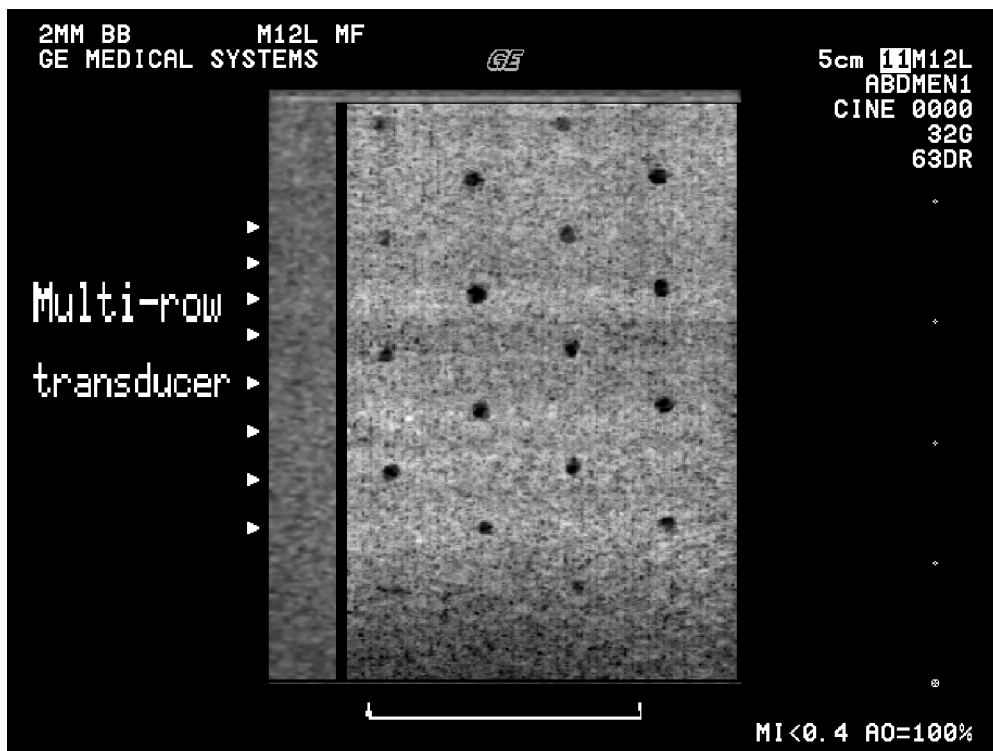
Aktivní část je přesně ta část, která nám převádí ultrazvukovou energii na energii elektrickou. Nejčastěji používaným materiálem je polarizovaná keramika, ale používají se i jiné materiály zejména piezoelektrické či ferroelektrické. Důležité je, aby byl materiál schopný kmitat na vysokých frekvencích, je – li elektricky buzen.



Obr. 1.7 Schéma možné konstrukce aktivního převodníku [6]

Vhodný materiál a vhodná konstrukce aktivních částí jsou pro chod převodníku jednou z nejdůležitějších podmínek. Na obrázku (Obr. 1.7) je vidět schematicky konstrukce aktivní části převodníku. Je zde krásně vidět, že se aktivní část převodníku skládá z tenkých keramických (piezoelektrických či ferroelektrických) prutů. Vlnění procházející tímto „lesem“ piezoelektrických prutů musí mít delší vlnovou délku než je vlastní velikost piezoelektrických prutů. Toto je jedna z podmínek toho, aby se kompozitní materiál choval jako materiál homogenní. Konkrétně je velikost volena jako polovina vlnové délky generované frekvence ultrazvukového vlnění.

Na druhém obrázku (Obr 1.8) je pak vidět reálné řešení aktivního elementu od společnosti GE Corporate Research & Development.



Obr. 1.8 Skutečný pohled na aktivní element převodníku [7]



## **Tlumení převodníku**

Tlumení převodníku je ta část převodníku, která absorbuje akustickou energii vyzařovanou ze zadní části aktivního elementu. Materiál tlumení je velice důležitý a jsou na něj kladeny specifické požadavky: materiál musí mít vysokou měrnou hmotnost a vysoké absorpční vlastnosti.

Tlumení převodníku, akustická impedance převodníku, může být nastaveno dvěma způsoby a to podle druhu převodníku a jeho užití. Rozhodujícím faktorem je rovnost či odlišnost akustických impedancí aktivního členu a tlumení.

První možností je, že hodnoty akustické impedance prvního členu jsou prakticky shodné s vysokou impedancí aktivního elementu. Tato shoda nám způsobuje, že tlumení bude dobře absorbovat akustickou energii a převodník tak bude poskytovat dobré časové rozlišení. Při návratu odraženého paprsku tedy dojde ke ztrátě akustické energie v tlumení. To způsobí snížení amplitudy ultrazvukového vlnění.

Druhou možností je, že zde dochází k určitému rozdílu mezi akustickou impedancí aktivní části a tlumení. Tento rozdíl mezi akustickými impedancemi způsobí, že se větší množství ultrazvukové energie odrazí zpět do aktivní části převodníku. V porovnání s předchozím případem je u tohoto typu tlumení nižší časové rozlišení a vyšší amplituda ultrazvukového vlnění.

## **Ochranná deska**

Ochranná destička neslouží pouze k ochraně vnitřních částí převodníku vůči nepříznivým vlivům okolí. Slouží také jako jakýsi transformátor akustické impedance.

V podstatě je to jakási mezivrstva mezi aktivním elementem, jež má vysokou akustickou impedanci, a měřenou tekutinou. Měřená tekutina má asi desetkrát nižší impedanci než aktivní element. Akustická impedance ochranné destičky se blíží akustické impedanci testovaných kapalin.

Další důležitou vlastností je přesná šířka ochranné destičky, ta je rovna čtvrtině vlnové délky generované frekvence ultrazvukového vlnění. Pokud vezmeme v úvahu šířku aktivního elementu, která, jak již bylo napsáno v části o aktivním elementu, je rovna půli vlnové délky generované frekvence, tak nám toto uspořádání zaručuje zvýšení účinnosti ultrazvukového převodníku.

Pokud jsou tedy z obou konců aktivního elementu generovány vlny, tak projdou přes ochrannou destičku a do kapaliny vstupují ve fázi. Vlnění je ve fázi, a tudíž je amplituda vystupující ultrazvukové vlny vyšší, tím je vyšší i účinnost celého převodníku.

### **1.4.2 Základní typy převodníků.**

Existuje poměrně velká škála převodníků všech možných tvarů, účelů a od různých výrobců. Vesměs se všechny dají rozřadit do dvou hlavních skupin podle toho, v jakém médiu jsou užity.

## Kontaktní převodníky

Převodníky, které se užívají pro měření v přímém kontaktu s pevnou látkou, se nazývají převodníky kontaktní. Na tyto převodníky je kladen poměrně zásadní požadavek, kterým je velice vysoká přesnost při uchycení na měřenou část. Kontaktní plochy musejí být velice dobře opracované, aby převodník dobře dosedl na plochu měřeného tělesa.

Při užití tohoto typu převodníku dostáváme maximální kontaktní účinnost. Z hlediska akustických impedancí je akustická impedance zkoušeného média prakticky stejná jako akustická impedance převodníku. Kontaktní převodníky se hodí pro nedestruktivní zkušební metody. Kontaktní převodníky lze užít jako generátory přímých podélných vln, nebo i jako generátory příčných vln.

Tento typ převodníků není příliš vhodný pro měření na zařízení UVP Monitor. Kontaktní převodníky se užívají zejména ke zjišťování závad uvnitř materiálu v kovových konstrukcích. Lze s nimi například pozorovat šířící se trhliny



*Obr. 1.9 Kontaktní převodníky firmy Gulf X-Ray Services [8]*

Na obrázku výše (Obr. 1.9) jsou vyobrazeny kontaktní převodníky od firmy Gulf X - Ray Services. Tyto převodníky generují podélné vlny.

Převodníky generující podélné i příčné vlny (Obr. 2.0) jsou od firmy GE Measurement & Control Solutions. „Průhledná“ část převodníku slouží jako vodič ultrazvuku mezi převodníkem a zkoumaným povrchem. Tato část vyplní vzduchovou mezeru, jež vznikne vykloněním čela převodníku.



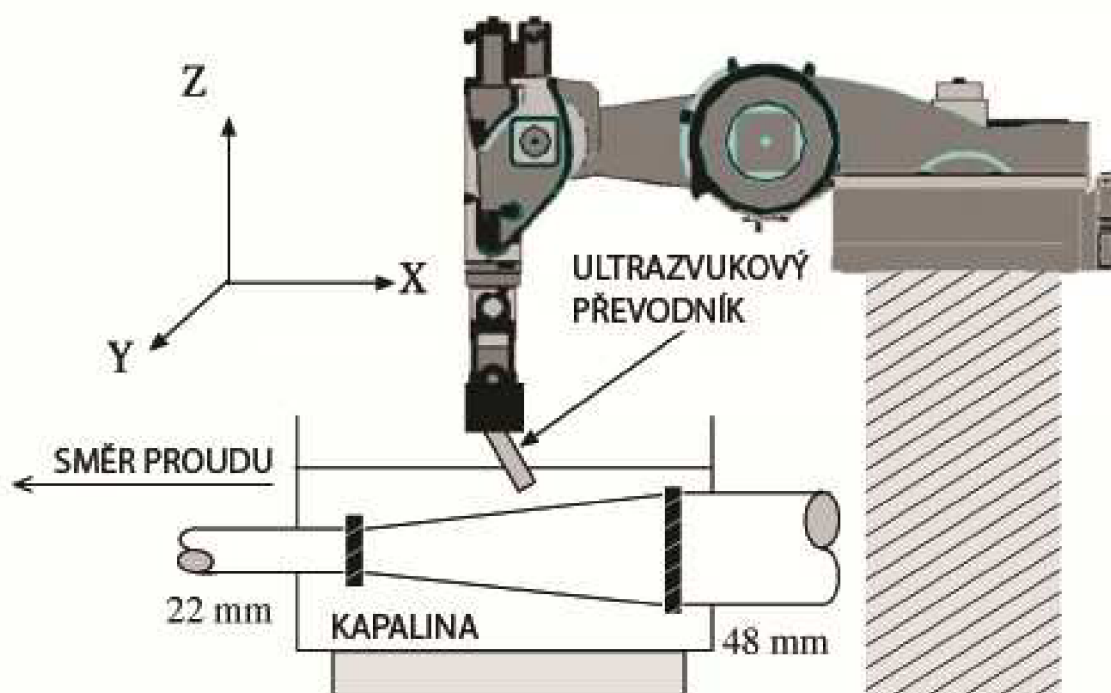
*Obr. 2.0 Kontaktní převodníky s proměnným vstupním úhlem [9]*

## Imerzní převodníky

Mezi imerzní převodníky řadíme ty převodníky, které pracují buď zcela, nebo jen částečně ponořeny do kapaliny. Kapalinou rozumíme testované medium nebo spojovací gel.

Imerzní převodník je v přímém rovnoměrném kontaktu s médiem, což je ideální případ, který eliminuje výchyly v citlivosti. Hlavní výhodou imerzního převodníku je ovšem možnost fokusace ultrazvukové energie do daného ohniska. Fokusace je vhodná při měření s malými částicemi, lze jí totiž zvýšit citlivost a zvyšovat prostorové rozlišení.

Imerzní převodníky se užívají při měření technikou UVP a v lékařských aplikacích. Často se používají při nedestruktivních metodách testování. Lze je používat ve skupinách ovládaných z centrálního počítače. Bývají často umístovány na roboty kvůli přesnému zavedení paprsku do kapaliny (Obr. 2.1)



Obr. 2.1 Schéma umístění převodníku na robotickou ruku [10]

Na obrázku níže (Obr. 2.2), jsou imerzní převodníky od firmy Met – Flow (výrobce zařízení UVP Monitor).

Konstrukce imerzních převodníků je velice podobná a je popsána v úvodu kapitoly 1.4.



Obr. 2.2 Kompletní řada imerzních převodníků od firmy Met – Flow [11]

### **Další typy převodníků**

Další typy převodníků už nejsou tak časté, jedná se spíše o speciální typy jako například vysokoteplotní převodníky. Jejich pouzdro je vyrobeno ze speciálního žáruvzdorného materiálu. Vysokoteplotní převodníky vypadají prakticky jako převodníky imerzní, jen je jejich vnitřní částí jsou tepelně odizolovány od speciálního pouzdra s homogenní tepelnou roztažností. Pro vyšší teploty cca nad 100°C se ještě, podle prospektů firmy Met – Flow, doporučuje tepelně odizolovat samotný převodník a médium. Běžně dostupné vysokoteplotní převodníky jsou schopny odolávat teplotám až do 300°C.

Mezi delší typy převodníků lze také zařadit tzv. dual – element transducers. V překladu jsou to převodníky s dvěma elementy. Tyto převodníky mají zvláště generátor a zvláště přijímač. Tato skutečnost zlepšuje jejich rozlišení v tzv. blízkém poli, tento pojem bude vysvětlen v následující kapitole. Obecně se tyto převodníky příliš často nepoužívají. Na obrázku (Obr 2.3) je dobře vidět čelní plocha převodníku se dvěma elementy. Princip je jednoduchý. Na levé ploše je generována ultrazvuková vlna, ta prochází měřeným médiem a odráží se do plochy napravo. Výhodou tohoto převodníku je, že může pracovat prakticky nepřetržitě.



Obr. 2.3 Převodník s dvěma elementy AtlasoDuals od firmy Olympus [12]

Posledním převodníkem, o kterém bych se rád zmínil, je tzv. fokusovaný převodník. Fokusované převodníky se od standardních imerzních převodníků liší tvarem aktivního

elementu a ochranné destičky. Standardní imerzní převodníky mají plochý aktivní prvek a generují rovinnou ultrazvukovou vlnu, která má v určité vzdálenosti od převodníku minimální průměr a maximální akustickou energii. Tato vzdálenost je nazývána přirozenou ohniskovou vzdáleností převodníku. Ohniskovou vzdálenost lze snížit změnou tvaru aktivního elementu a ochranné destička z plochého na sférický (konkávni). Sférický tvar nám v podstatě představuje jakousi čočku, která nám koncentruje akustickou energii blíže k převodníku. Vlna vystupující z fokusovaného převodníku je sférická. Fokusované převodníky se nejčastěji užívají v aplikacích, kde je nutno měřit v malé hloubce a s vysokým útlumem zvuku. Tyto převodníky jsou velice drahé a vyrábí se podle požadavků zadavatele v kusové výrobě.

### 1.4.3 Zvukové pole generované převodníky.

Vzhledem k tomu, že šíření zvuku souvisí s tlakovými podmínkami v médiu a převodníku, lze pro popis ultrazvukového paprsku generovaného převodníkem užít vztahu (17):

$$p = p_0 \cdot 2 \cdot \sin \left\{ \frac{\pi}{2} \left[ \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 + z^2} - z \right] \right\} \quad (17)$$

kde  $p$  – akustický tlak [Pa]  
 $p_0$  – referenční tlak na převodníku [Pa]  
 $\lambda$  – vlnová délka [m]  
 $D$  – aktivní průměr převodníku [m]  
 $z$  – koordináta podle akustické osy ultrazvukového paprsku

Pole generované převodníkem lze rozdělit podle polohy ohniska na blízké pole a vzdálené pole.

V oblasti tzv. blízkého pole se akustické tlakové pole paprsku vzájemně reguluje, prochází sérií minim a maxim, jak je vidět z obrázku (Obr. 2.4). Posledního maxima dosahuje akustické tlakové pole ve vzdálenosti  $N$ , jež se nazývá délka blízkého pole. Z obrázku je také vidět že zóna blízkého pole přechází do zóny vzdáleného pole v tzv. ohnisku (tento pojem byl vysvětlen v kapitole 1.4.2).

Pro délku blízkého pole platí vztah:

$$N = \frac{D^2 \cdot f_0}{4 \cdot c} \quad (18)$$

kde  $N$  – délka blízkého pole [m]  
 $D$  – průměr aktivního elementu [m]  
 $f_0$  – základní ultrazvuková frekvence [Hz]  
 $c$  – rychlost zvuku [m/s]

V oblasti tzv. vzdáleného pole je poloha maxima akustického tlaku vždy na akustické ose ultrazvukového paprsku. Z obrázku (Obr. 2.4) je vidět, že tlakové maximum se na akustickou osu paprsku musí dostat z jisté hodnoty. Paprsek tedy diverguje v oblasti, která začíná v přirozeném ohnisku převodníku (ve vzdálenosti  $N$  od přední části převodníku), a to pod konstantním úhlem. Pro popis tohoto chování se definuje tzv. polo

úhel divergence (úhel od osy k okraji), bereme ho jako polo – šířku zvukového pole, ve kterém tlak poklesne na polovinu. Pro případ kruhového převodníku byl odvozen vztah:

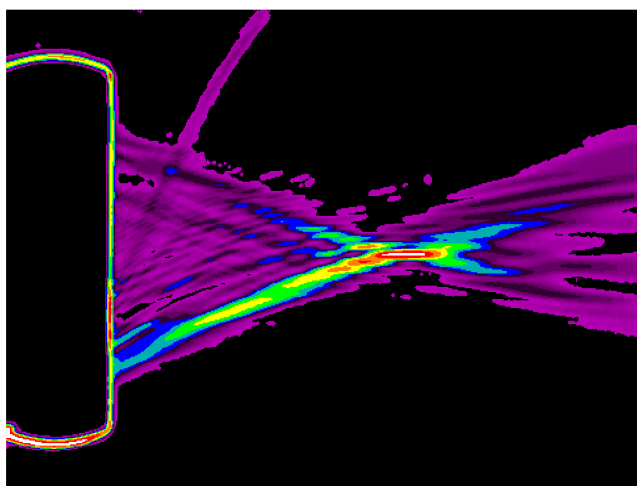
$$\gamma_0 = \sin^{-1} \left( \frac{0.51 \cdot \lambda}{D} \right) \quad (19)$$

kde  $\gamma_0$  – polo úhel divergence paprsku (pro pokles 6 dB) [°]  
 $\lambda$  – vlnová délka ultrazvuku [m]  
D – aktivní průměr převodníku [m]

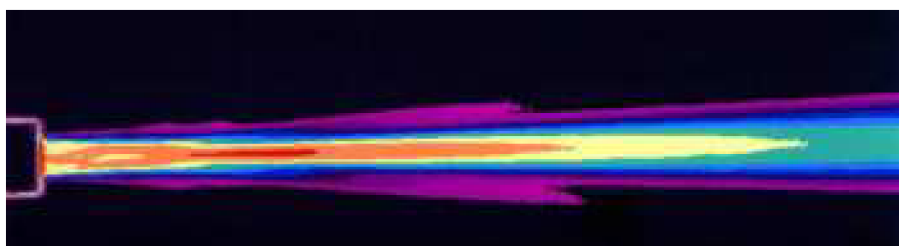
Z rovnosti (19) je vidět, že při stejných frekvencích mají převodníky s nižším průměrem aktivní části vyšší hodnoty divergence a naopak.

Čím budou hodnoty divergence vyšší, tím dříve ztratí paprsek svou intenzitu. Pro běžně užívané převodníky platí, že pro vyšší základní frekvence ultrazvukového vlnění je podstatně lepší šíření paprsku v požadovaném směru (je nižší divergence).

Na obrázcích (Obr. 2.4, Obr. 2.5) je vidět rozdíl mezi ultrazvukovými poli generovanými fokusovaným a nefokusovaným převodníkem.



Obr. 2.4 Ultrazvukové pole generované fokusovaným převodníkem [13]



Obr. 2.5 Ultrazvukové pole generované nefokusovaným převodníkem [14]

V příloze 1 jsou uvedeny tabulky délky blízkého pole v závislosti na průměru převodníku. A hodnoty divergence jako funkce aktivního průměru převodníku a vlnové délky ultrazvuku.

## 1.5 Výhody a využití – UVP

Vzhledem k vlastnostem ultrazvuku může být ultrazvukový převodník umístěn vně proudící kapaliny, nedochází tudíž k ovlivnění proudového pole. Převodník lze umístit i mimo potrubí nebo za překážku, je ovšem nutné dát si pozor na kombinaci materiálů, jimiž ultrazvuková vlna prochází. To je výhodné pokud není možné proniknout do potrubí. Výhodou tedy je, že při měření není nutné zasahovat do stávající konfigurace trati. Měření přes stěnu potrubí je velice náchylné na vlivy odrazu, lomu a absorpce zvuku.

Zařízení UVP lze užívat na měření rozsáhlé škály kapalin, nicméně jeho funkce je uzpůsobena zejména pro měření s vodou. UVP může být použito i pro měření v médiích, jež jsou neprůhledné či silně znečištěné. Jako příklad těchto médií je nejčastěji uváděn roztavený kov, dále proudění mléka v mlékárnách, proudění čokolády v čokoládovnách, proudění kalových a odpadních vod apod. Jelikož zařízení UVP může měřit bezkontaktně a nemusí „vidět“ do měřeného prostoru, používá se velice často k měření v chemických provozech. Zařízení UVP Monitor je velice vhodné pro měření více fázových kapalin, například základní dvoufázovou kombinaci kapalina – plyn, zde ale musíme být opatrní a brát v potaz vlastnosti šíření ultrazvukového paprsku ve vícesložkových médiích.

Vzhledem k tomu, že toto zařízení je schopno okamžitě vyhodnocovat průměty rychlostních profilů podél měřicí osy, celková doba měření může být dosti snížena. UVP Monitor je schopný zaznamenávat rychlostní profily a vytvářet tak celou historii proudění. UVP může detekovat i zpětná proudění.

## 2. Particle Image Velocimetry – PIV

### 2.1 Metoda PIV - Úvod

Particle Image Velocimetry je asi nejmodernější metoda pro měření rychlostního pole při proudění nejen kapalin, ale i plynů. Je to optická metoda umožňující změřit okamžité hodnoty velikosti a směru vektoru rychlosti v daném průřezu toku. Do kapaliny jsou zavedeny tzv. reflexní částice, od kterých se odráží laserový paprsek. Metodou PIV lze měřit nejen 2D proudění. Pokud použijeme stereoskopický přístup, lze k měření přidat ještě třetí rozměr. Měřením za použití metody PIV tedy lze za použití moderních digitálních kamer a vhodného počítačového programu dosáhnout dokonalého zmapování rychlostních polí a to v reálném čase.

Tato metoda bývá často srovnávána s metodou LDA. Hlavní rozdíl je právě ve schopnosti měřit rychlostní pole u metody PIV, metoda LDA měří rychlost pouze v jednom bodě.

### 2.2 Základní komponenty a popis práce

Zařízení pro měření metodou PIV může mít různá uspořádání, podle toho, jestli budeme měřit 2D či 3D, principiálně jsou ovšem oba tyto způsoby v podstatě stejné. Protože se jedná o optickou metodu, tak je dobré provádět měření v zatemněném prostoru.

Prvky nutné k měření metodou PIV:

1. **Reflexní částice** – do média musí být přimíchány reflexní částice, od kterých se odráží laserové světlo.
2. **Pulzní laser** – s jeho pomocí jsou do média vyslány dva krátké světelné pulzy (6 – 10 ns) s určitým časovým rozdílem, tyto pulzy osvětlí reflexní částice. Frekvence pulzních laserů dosahuje až 1000 Hz a rozhoduje o počtu pořízených snímků za 1 sekundu.
3. **Optika zavádějící světelný paprsek do kapaliny** – upravuje úzký světelný paprsek z laseru na tvar tzv. světelného nože. Světelným rozumíme velice tenkou rovinu, která proniká do měřeného média. Nejčastěji je v úloze optického usměrňovače válcová čočka.
4. **CCD nebo CMOS kamera** – vysokofrekvenční kamery schopné dosáhnout až 1000 Fps, kamera musí být schopná zachytit snímek při prvním pulzu a zaznamenat ho a po té být schopna zaznamenat snímek od druhého pulzu. Časová prodleva mezi pulzy bývá 100ns.
5. **Řídicí jednotka** – jejím hlavním úkolem je časově sladit kamery s laserem.
6. **Pracovní software** – zajišťující sběr dat, jejich vyhodnocení a rychlé zobrazení.
7. **Vysoce výkonný počítač** – je nutný pro vyhodnocování výsledků měření.

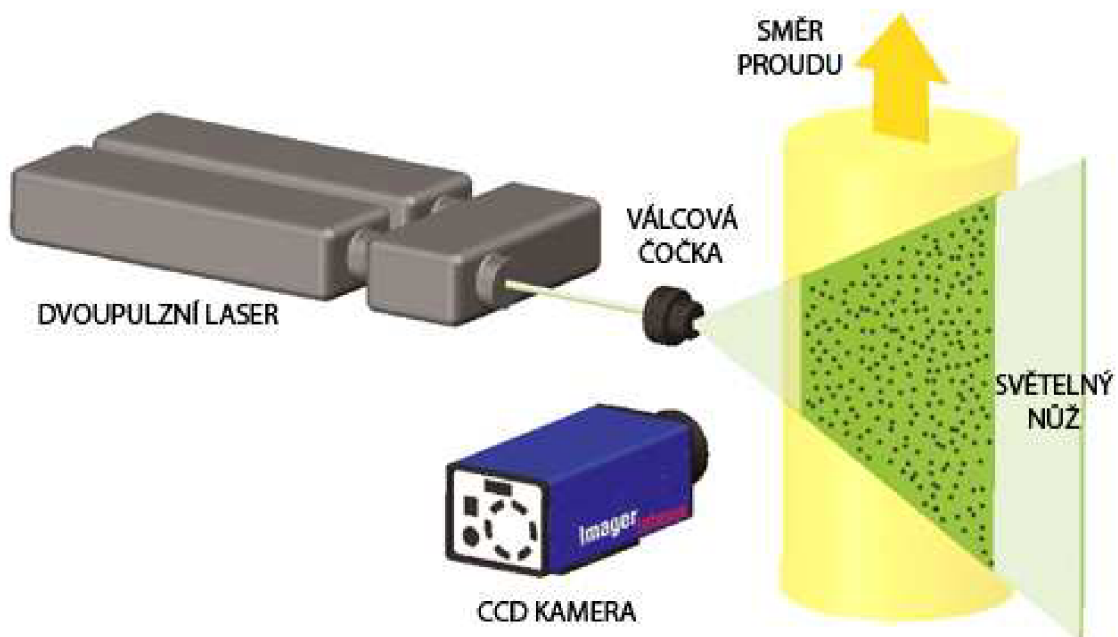


### 2.2.1 Popis práce zařízení PIV

Pulzní laser generuje úzký světelný paprsek. Paprsek putuje buď prostředím přímo z laseru, anebo optickým kabelem k válcové čočce. Užití optického kabelu je vhodné v obtížně přístupných prostorách a lze pomocí něj paprsek nasměrovat do míst, kde je třeba provést měření. Zde je paprsek převeden do tvaru již dříve zmiňovaného světelného nože. Ten prosvětluje kapalinu v určité ploše. Osvětlená plocha je ohraničena zorným polem vysokofrekvenční kamery.

Odrazy od reflexních částic jsou zaznamenávány vysokofrekvenčními kamerami. Používají se CCD kamery napojené přes digitalizační čip do počítače. V počítači musí být speciální PIV čip. PIV čip je schopen vyhodnotit data z jednoho měření. Data z více měření v daných rovinách či paralelních rovinách jsou dále zpracovávána v datovém procesoru. Procesory vyhodnocují informace o změně polohy a časové diferenci, z těchto dvou údajů je počítána rychlost. Díky těmto dvěma procesorům lze získávat například vektorovou mapu rychlostního pole (z čipu PIV), obraz 3D proudění anebo střední hodnoty rychlosti.

Na obrázku (Obr. 2.6) je schematicky znázorněná měřicí sestava pro 2D měření.



Obr. 2.6 Schematické znázornění 2D měření metodou PIV [15]

Pochopení vyhodnocování získaných obrazů je klíčem k pochopení jedinečnosti zařízení PIV. V jednoduchosti zde vysvětlím princip analýzy dat. Této problematice se hlouběji věnují na <http://www.koncerto.biz>.

### 2.2.2 Princip vyhodnocování hodnot

Jakmile zařízení PIV úspěšně zaznamená obrazy po obou pulzech, probíhá na čípech analýza. Obrazy jsou rozděleny na malé obrazové elementy o velikosti několika desítek pixelů. Pro jednoduchost budeme sledovat pohyb pouze jedné částice.

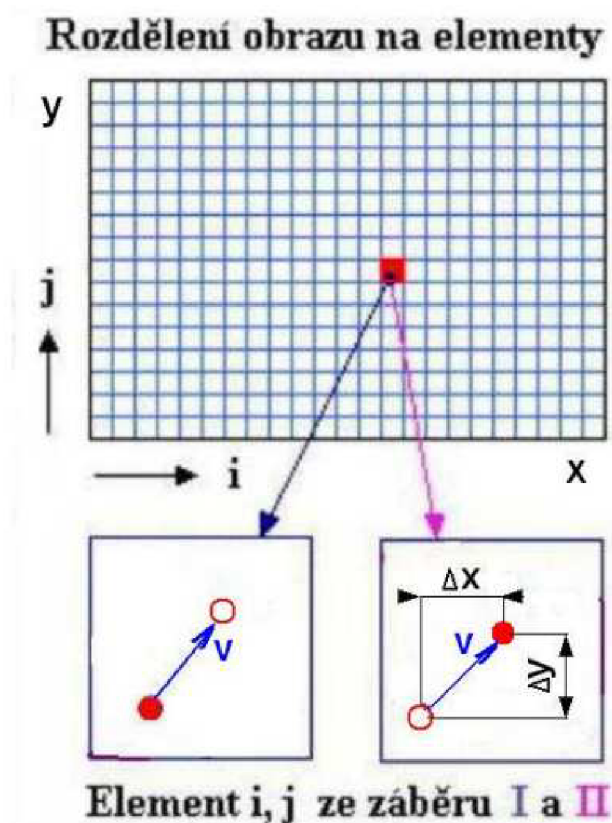
Laser vyšle první paprsek. Ten dorazí na částici a ozáří ji. Vysokofrekvenční kamera zachytí částici v dané poloze. Částice se v čase mezi vysláním druhého laserového pulzu, který označíme  $\chi$ , posunula, ale neopustila svůj obrazový element. Nyní je vyslán druhý laserový impulz. A nová poloha částice je zachycena kamerou. Částice se posunula o vzdálenost  $\Delta x$  po ose  $x$  a o vzdálenost  $\Delta y$  po ose  $y$ . Protože vzdálenosti známe, zjistíme je porovnáním poloh na prvním obrazu a na druhém obrazu lze dopočítat rychlosti:

$$v_x = \frac{\Delta x}{\Delta \chi} \quad (20)$$

$$v_y = \frac{\Delta y}{\Delta \chi} \quad (21)$$

Tento zjednodušený systém můžeme vidět na obrázku níže (Obr. 2.7).

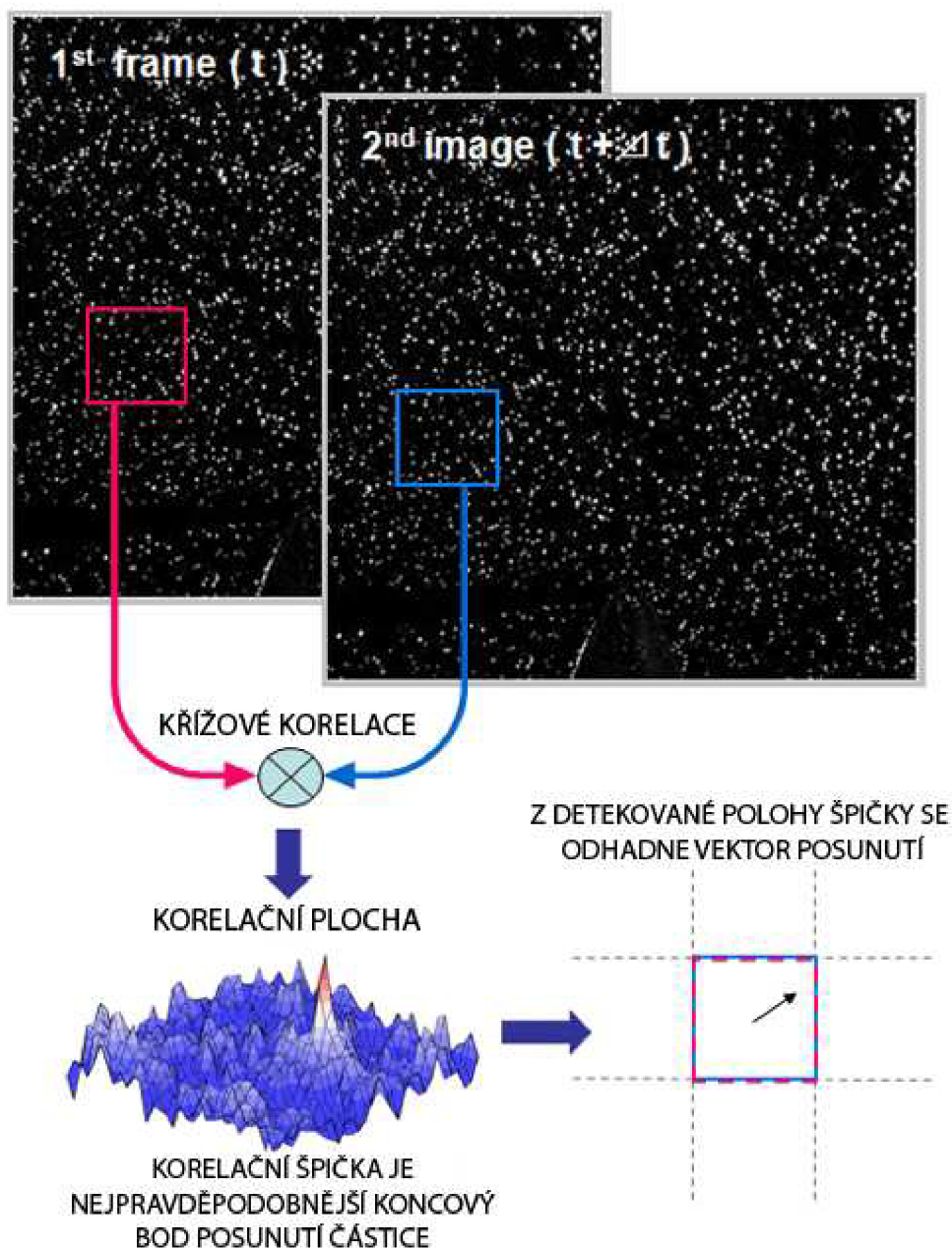
Takto popsaný systém vyhodnocování je velice zjednodušený, ale v podstatě takto zařízení funguje. V reálném měření ovšem nesledujeme pouze jednu částici, ale obrovské množství částic.



Obr. 2.7 Schematická ukázka vyhodnocování posuvu pro jedinou částici metodou PIV [16]

V reálné situaci není možné přiřadit částicím na prvním obrázku (po vyslání prvního laserového paprsku) novou polohu na obrázku druhém (po vyslání druhého laserového

paprsku). V tomto případě se postupuje metodou vzájemné korelace obrázků, porovnají se četnosti posuvů po ose x ( $\Delta x$ ) a četnosti posuvů po ose y ( $\Delta y$ ). Reálnou situaci můžeme vidět na obrázku od firmy SEIKA CORPORATION (Obr. 2.8).



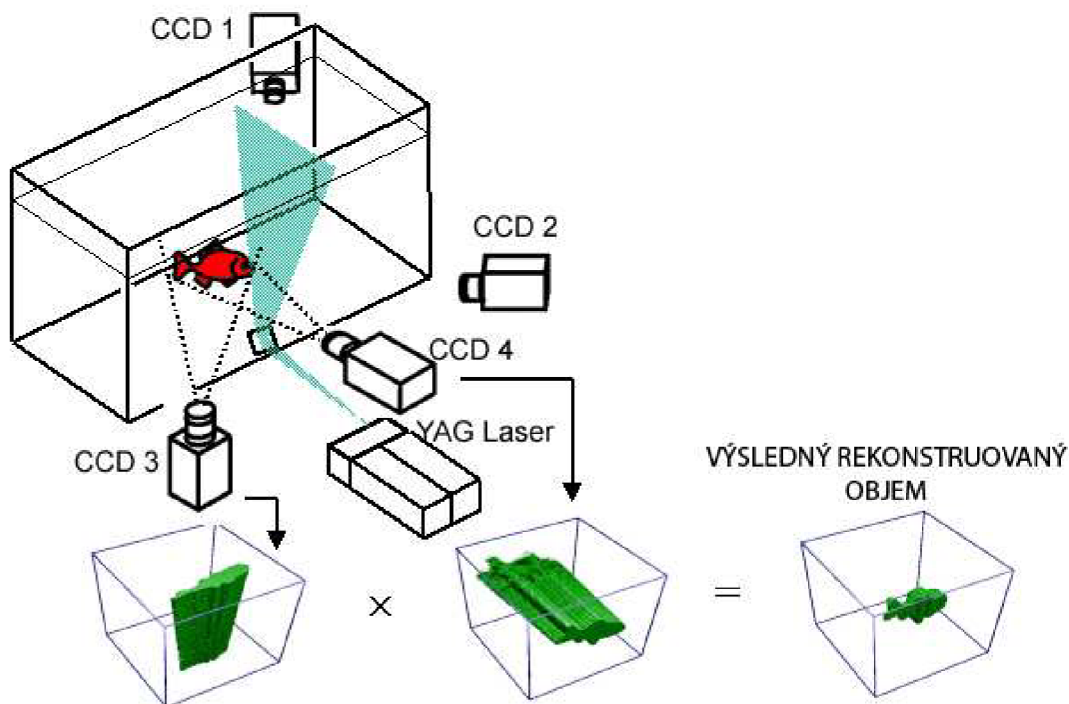
Obr. 2.8 Ukázka reálné situace při vyhodnocování měřených hodnot u metody PIV [17]

### 2.2.3 Princip měření 3D

Pokud chceme provádět 3D mapování proudu, je nutné využít principu stereoskopie. Stereoskopie je vlastně iluze prostorového vidění způsobená tím, že každému oku poskytneme o trochu jiný, o určitý úhel pootočený, obraz.

Princip měření je shodný s měřením 2D, jen nám navíc přibude jedna kamera pootočená o určitý úhel vůči kameře první. Kamery ovšem nejsou oči. U kamer musíme vzít v potaz, že pohled pod nějakým úhlem vede také k obrazu pod tímto úhlem. Z toho vyplývá, že pohled kamery je soustředěn pouze do jednoho malého místa. Řešením tohoto problému je naklonit celou kameru tak, aby snímala v nakloněné ohniskové rovině. Problém se ovšem řeší softwarově. Mezi objektivem a vnitřkem kamery je vložený adaptér. Adaptér upravuje zkreslený obraz pomocí zobrazovacího softwaru.

Názorná ukázka využití metody PIV (Obr. 2.9). Vědci z japonské university v Tsukubě sledovali proudění vody okolo plovoucí ryby v akváriu.



Obr. 2.9 Ukázka využití metody PIV, včetně schematických záběrů z dvojice kamer [18]

### 2.3 Výhody a příklady použití techniky PIV

Měření technikou PIV je používáno prakticky všude tam, kde se užívá měření metodou LDA. Jak již bylo dříve napsáno, metoda PIV poskytuje záznam o rychlostním poli, zatím co metoda LDA nám poskytne přesný údaj o rychlosti v daném „bodě“. Často bývají obě tyto metody kombinovány. Nelze je ovšem použít současně. Obě metody jsou založeny na snímání světla odraženého z reflexních částic, a tudíž je nelze užít současně kvůli případným interferencím. Metoda PIV může být kombinována s metodou UVP, a to při současném měření jak na zařízení UVP, tak PIV.

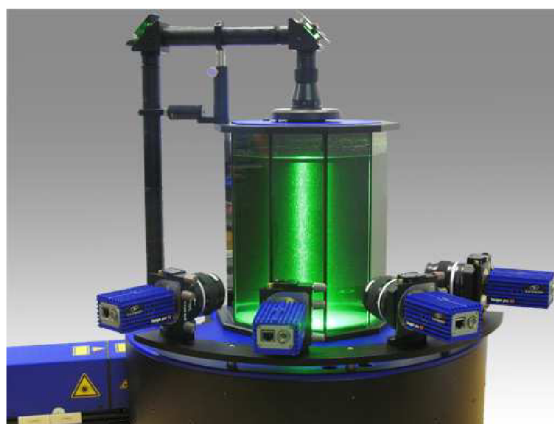
Základními experimenty prováděnými technikou PIV jsou zkoušky v aerodynamických tunelech. Jedná se o zkoušky jednotlivých komponentů v automobilovém, leteckém,

lodním, ale i stavebním průmyslu. Samozřejmě lze určovat rychlostní profil i okolo celých automobilů a velkých komponentů u letadel (Obr. 3.0).



*Obr. 3.0 Ukázka využití metody PIV, v automobilovém průmyslu – aerodynamický tunel [19]*

Další klasickou aplikací je výzkum chování kapaliny v jednotlivých potrubních systémech a komponentách (kolena, odbočky, difuzory, konfuzory, ventily apod.).



*Obr. 3.1 Ukázka využití metody tomografické PIV [20]*

PIV nachází stále větší uplatnění při vědeckých výzkumech. Na obrázku (Obr. 2.9) je zajímavá ukázka užití metody PIV. Vědci z japonské univerzity v Tsukubě sledovali proudění v okolí pohybující se ryby.

Metoda PIV je metodou nedestruktivní, tudíž není nutné zavádět žádnou část zařízení do proudu, nedochází tak k ovlivnění proudění.

Je ale nutné do dané oblasti „vidět“, jak je patrné z obrázku výše (Obr. 3.1) a je vhodné, aby zařízení pracovalo potmě. Nevýhodou užití metody PIV je vysoká pořizovací cena.

### 3. LASER DOPPLER ANEMOMETRY – LDA

#### 3.1 Metoda LDA - Úvod

LDA v překladu Laserová dopplerovská anemometrie, též známá jako LDV – Laser Doppler Velocimetry, je optická nedestruktivní technika vhodná pro měření 1D, 2D a 3D rozložení rychlosti a turbulence bodu pro volné proudění či vnitřní proudění. Technika LDA jako taková je používána již po tři desetiletí. Za tuto dobu byly velice dobře zmapovány její možnosti.

Jak již bylo dříve zmíněno, v porovnání s metodou PIV, která dokáže měřit celé rychlostní pole, tak pomocí metody LDA jsme schopni změřit, při dané konfiguraci, všechny tři složky rychlosti.

#### 3.2 Základní komponenty

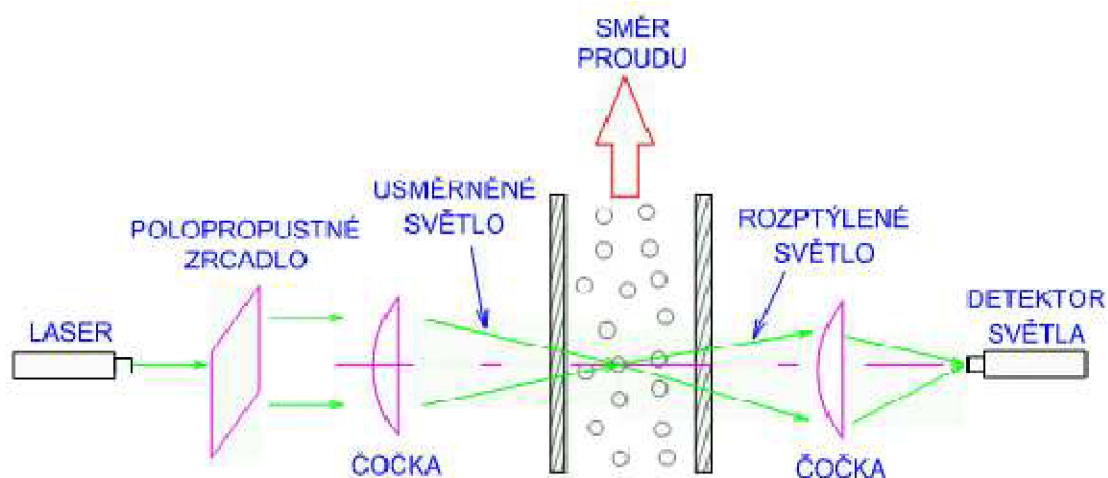
Podobně jako předešlé metody, je i pro metodu LDA naprostou nutností přítomnost reflexních částic uvnitř kapaliny. Metoda LDA je v podstatě založena na měření laserového světla rozptýleného od částic, které projdou sérií interferenčních proužků (série tmavých a světlých ploch). Rozptýlené laserové světlo kmitá s určitou specifickou frekvencí. Tato frekvence souvisí s rychlostí částic. Technika LDA tedy využívá Dopplerův efekt. Podle Dopplera se při vzájemném relativním pohybu zdroje a přijímače mění frekvence vlnění, jež je vysíláno zdrojem vzhledem k přijímači.

Prvky nutné k měření metodou PIV:

1. **Reflexní částice** – do média musí být přimíchány reflexní částice, od kterých se odrazí laserové světlo. Reflexní částice mají průměr cca 0,25 – 0,35  $\mu\text{m}$ . Koncentrace částic nutná pro detekci intenzity rozptýleného světla je asi  $10^8$  částic/ $\text{cm}^3$ .
2. **Laser** – zdroj vysoce monochromatického a přímkově polarizovaného koherentního světla. Je užíván jako snímač rychlosti. Paprsek není silnější než 0.5 mm.
3. **Optika č. 1:**
  - **Polopropustné zrcadlo** – dělí úzký světelný paprsek z laseru na dva paprsky stejné intenzity.
  - **Čočka** – Usměrnjuje dvojici paprsků z polopropustného zrcadla do jediného měřicího bodu.
4. **Optika č. 2 – Čočka** – Usměrnjuje odražené paprsky do detektoru světla
5. **Detektor světla** – Snímá usměrněné světlo, obvykle obsahuje tzv. fotonásobič.
  - **Fotonásobič** – Poskytuje potřebné zesílení signálu
6. **Frekvenční demodulátor**

### 3.3 Popis práce zařízení LDA

Na obrázku níže (Obr. 3.2) je schematicky znázorněno nejčastější měřicí uspořádání při technice LDA.

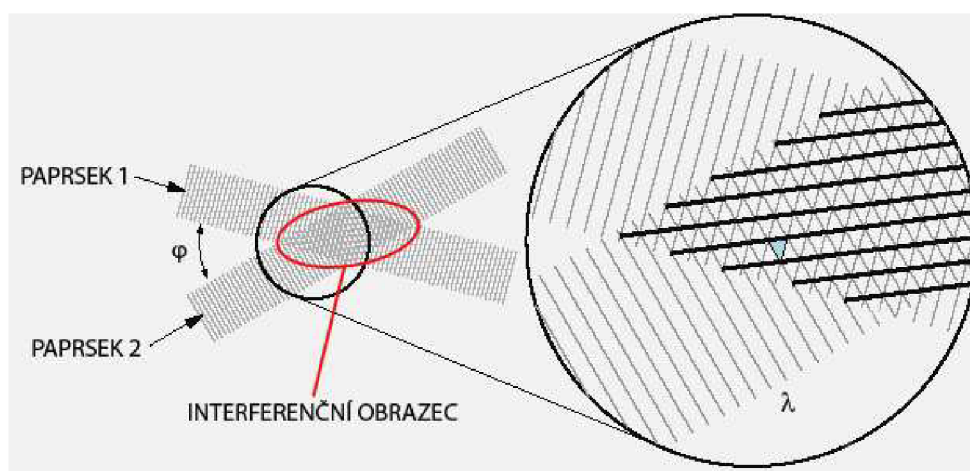


Obr. 3.2 Schematické znázornění principu měření za pomoci techniky LDA

Laser vyšle paprsek, který se v optické soustavě (polopropustné zrcadlo + čočka) dělí na dva paprsky stejné intenzity, a je usměrněn do jednoho určitého „bodu“. V místě průniku paprsků dochází k interferenci světla, jak je vidět na obrázku (Obr. 3.2). Důležitým kritériem je vzájemná vzdálenost vzniklých interferenčních proužků. Tuto vzdálenost lze spočítat z následujícího vzorce:

$$\Delta y = \frac{\lambda}{2} \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \quad (22)$$

kde  $\varphi$  – úhel mezi dopadajícími laserovými paprsky [°]  
 $\lambda$  – vlnová délka [m]  
 $\Delta y$  – vzdálenost mezi interferenčními proužky [m]



Obr. 3.3 Interferenční obrazec v místě průniku paprsků.[21]

Vzhledem k tomu, že metoda LDA využívá Dopplerova jevu, je pro přesné určení rychlosti v daném bodě nezbytné zjistit Dopplerovskou frekvenci.

Dopplerovská frekvence je rovna převrácené hodnotě doby průchodu částice mezi sousedními interferenčními proužky. Dopplerovo frekvenční posunutí bývá velice malé, proto bývá problém s jeho detekcí. Aby bylo Dopplerovský posuv možno detekovat, je nutné, aby byl zdroj světla monochromatický s úzkou spektrální čarou. S vyhodnocováním takto malých posunutí je problematické, ale lze jej velice přesně provést za pomoci tzv. interferenčního obrazce (Obr. 3.3). Interferenční obrazec vzniká v detektoru při zpracování interferenčního světla a tzv. porovnávacího světelného svazku. Porovnávací světelný svazek je takový svazek, který má frekvenci velice blízkou frekvenci monochromatického, koherentního měřicího laserového paprsku.

Světlo je tedy po odrazu od částice rozptýleno. Toto rozptýlené světlo je za pomoci čočky usměrněno do detektoru a následně je signál zesílen fotonásobičem. Z foto násobiče je zesílený signál veden přes úzkopásmové filtry (odstranění šumu signálu) do tzv. demodulátoru (odděluje vysokofrekvenční nosný signál od nízkofrekvenčního modulačního signálu). Signál je následně vyhodnocen. Vyhodnocení spočívá ve vyhodnocení Dopplerovského posuvu frekvence.

Pro výslednou rychlost v měřeném bodě platí rovnice:

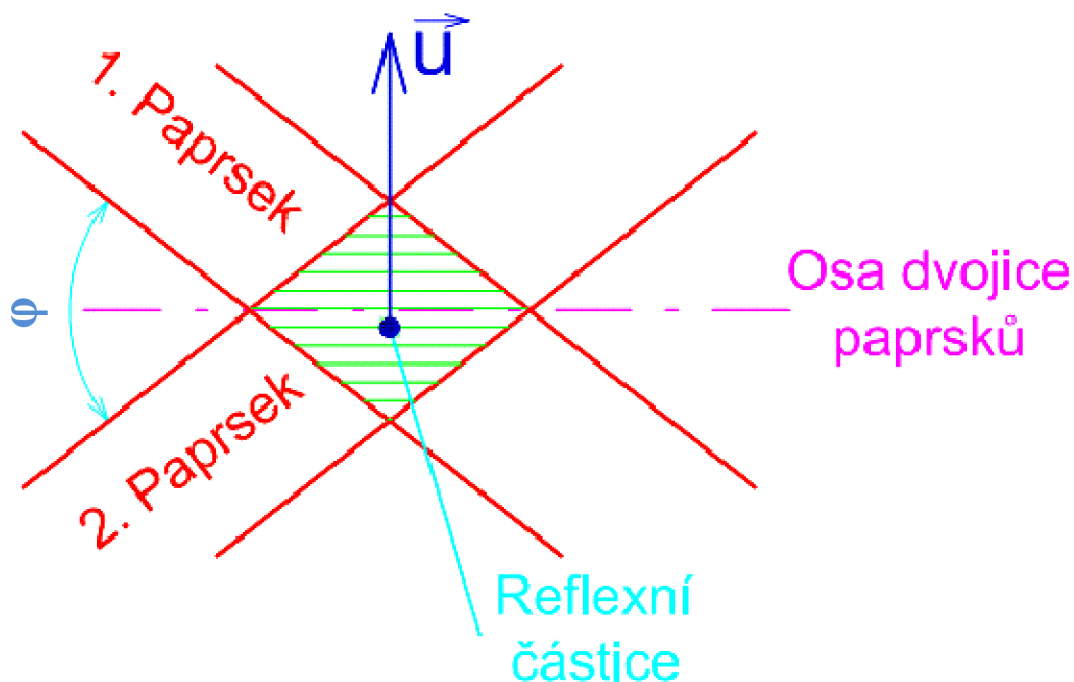
$$u = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{f_D}{\sin \frac{\varphi}{2}} \quad (23)$$

Kde  $u$  – velikost rychlost v měřeném bodě [m/s]  
 $\lambda$  – vlnová délka laserového světla [m]  
 $\varphi$  – úhel mezi vstupními laserovými paprsky [°]  
 $f_D$  – Dopplerova frekvence [Hz]

Vektor rychlosti je kolmý na osu dvojice paprsků a, jak je patrné z obrázku (Obr. 3.4), je taktéž kolmý na interferenční proužky. Vektor rychlosti leží v rovině vytyčené oběma paprsky.

Průsečíkem dvou laserových paprsků je elipsoid. Protože metoda LDA umožňuje měření rychlosti v lokálně, prakticky bodově, je pro měření nezbytně nutné, aby elipsoid měl malou šířku. To znamená, aby byl měřicí bod co nejmenší. Velikost elipsoidu lze ovlivnit změnou úhlu vstupujících paprsků ( $\varphi$ ). Se snižujícím se úhlem  $\varphi$  se elipsoid zužuje. Celá tato redukce velikosti má ovšem jeden háček. Tím je snižování ohniskové vzdálenosti. Abychom tomu předešli, nehýbeme pouze s úhlem  $\varphi$ , ale také s vzájemnou vzdáleností dvojice paprsků vstupujících do optiky (čočky).



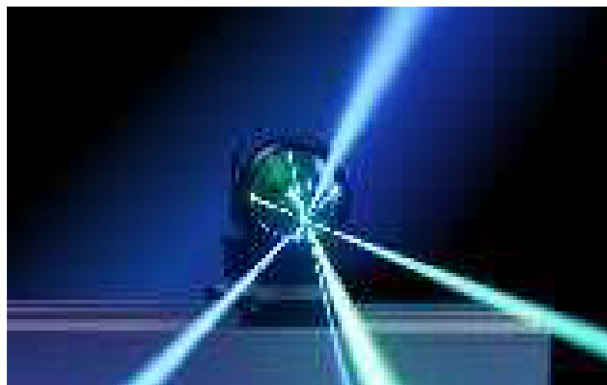


Obr. 3.4 Znáznornění polohy vektoru rychlosti v měřící oblasti.

### 3.4 Výhody a příklady použití techniky LDA

Anemometr umožňuje měřit místní rychlost bez zásahu do proudění. Anemometry patří mezi absolutní měřidla, není je proto nutné kalibrovat. Technikou LDA je možné měřit rychlost proudění jak kapalin, tak plynů. Jak již bylo zmíněno dříve, jde o optický bezdotykový systém.

Mezi hlavní výhody patří nezávislost měření na teplotě a tlaku tekutiny. Dále pak možnost měřit rychlost lokálně. Výhodou může být i velikost zařízení. Pro měření 2D dokonce i 2D dnes stačí použít pouze jeden laserový vysílač (Obr. 3.5)

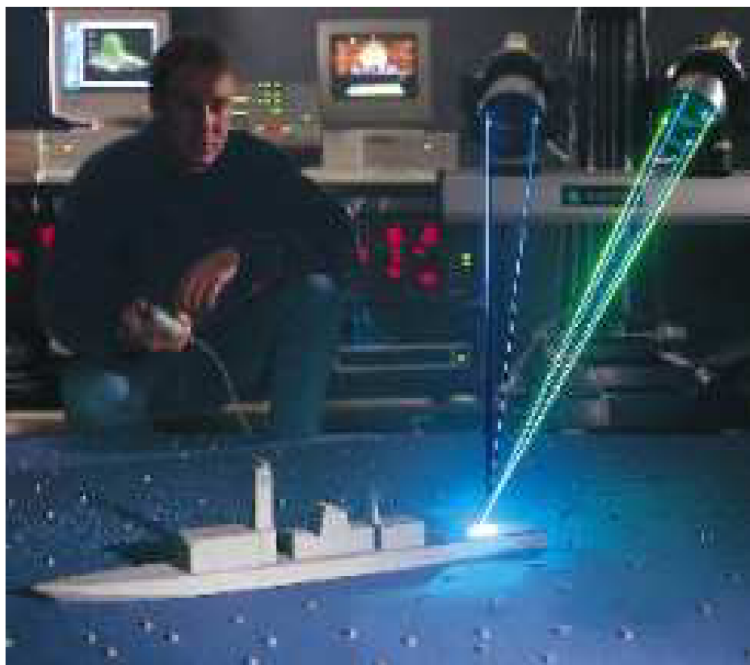


Obr. 3.5 Moderní laserový vysílač od firmy Dantec Dynamic [22]

Technika LDA našla své uplatnění zejména v automobilovém průmyslu. Zařízení LDA jsou standardní výbavou aerodynamických tunelů mnoha světových automobilek,

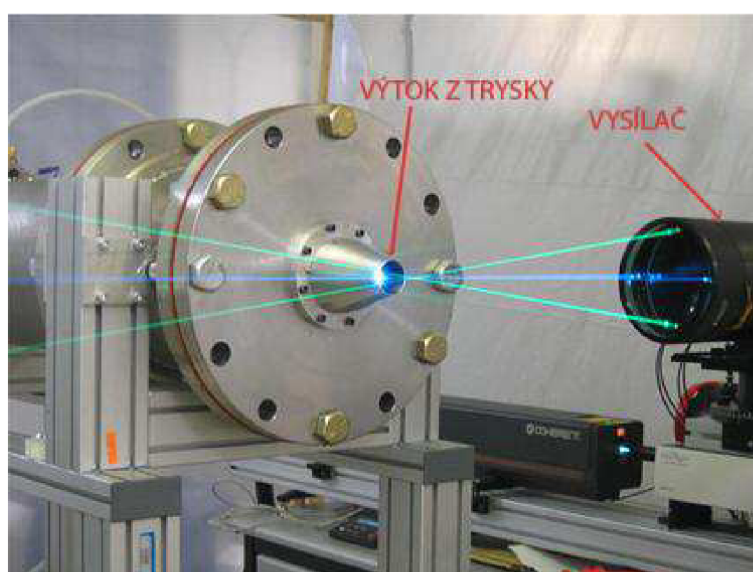
leteckých společností a výrobců vlaků. Často jsou metodou LDA zkoumány modely součástí montovaných na dopravní prostředky.

Další typickou aplikací je měření rychlosti vodních toků. Což úzce souvisí s lodním průmyslem (konstrukce trupu lodí viz Obr. 3.6). Metoda LDA se užívá například pro dimenzování vodních kanálů a přepadů. Modelování přílivových vln.



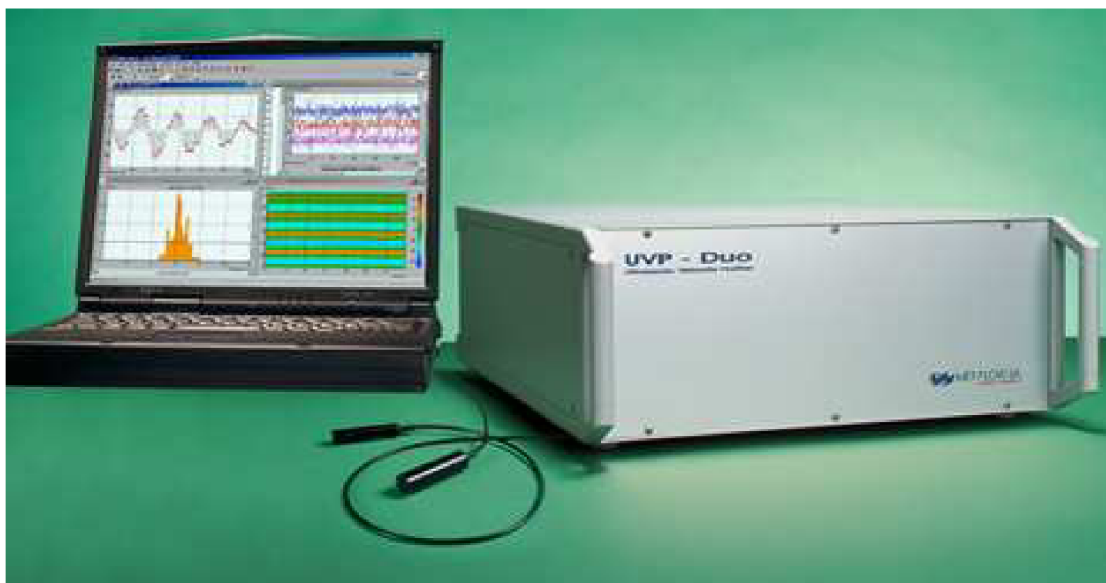
*Obr. 3.6 Proměrování trupu lodi metodou 3D LDA [23]*

Metody LDA se využívá také všude, kde je potřeba měřit lokálně rychlost, například u výtoků z trysek, kde zkoumáme rychlost kapiček ať už uvnitř trysky nebo těsně za hrdlem (Obr. 3.7).



*Obr. 3.7 Měření rychlosti na výtoku z trysky [24]*

## 4. ZKUŠEBNÍ MĚŘENÍ – UVP Monitor



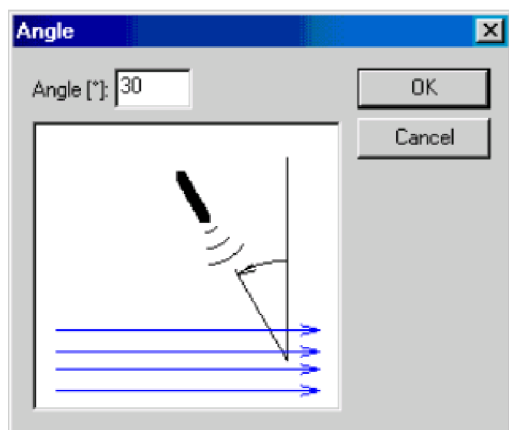
*Obr. 3.8 Zařízení UVP Monitor model UVP – Duo od firmy Met –Flow [25]*

Jedním z cílů této práce bylo provedení zkušebního měření se zařízením UVP Monitor (mode l UVP – DUO, Obr. 3.8).

Vzhledem k tomu, že zařízení bylo nově zakoupeno a žádné měření na něm zatím neprobíhalo, bylo v podstatě mým úkolem pokusit se zařízení rozběhnout a v ideálním případě něco smysluplného naměřit.

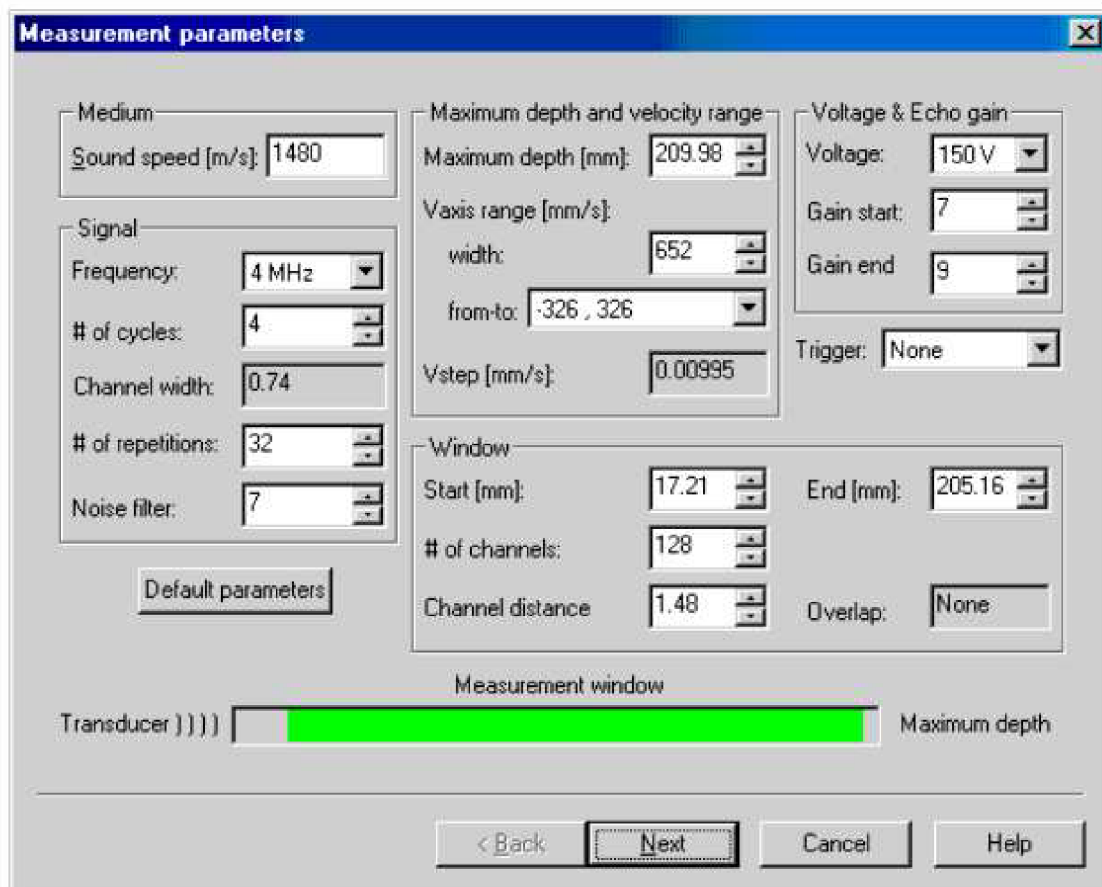
Zařízení UVP Monitor bylo od pana Ing. Hudce zapojeno a software byl nainstalován do počítače. Při prvním měření šlo o to, abych se seznámil s ovládacím softwarem.

Software (Verze 3) je velice dobře zpracovaný a poskytuje dobrý přehled o průběhu měření a o nastavených hodnotách (Obr. 4.0). Nastavit můžeme všechny veličiny popsané v kapitole 1 a podkapitolách 1.3.1 – 1.3.7. Hodnoty veličin, které jsou vzájemně provázány, jako například maximální měřitelná hloubka a rychlostní rozsah, či šířka měřicího okna apod., jsou softwarově kontrolovány, tudíž nelze zadat například hodnotu šířky měřicího okna větší než je maximální měřitelná hloubka. Mezi nejdůležitější nastavované parametry, a také ty nejproblematictější, patří úhel ultrazvukového paprsku vystupujícího z převodníku (úhel odklonu převodníku od kolmice, Obr. 3.9) a rychlost zvuku v měřeném médiu.



Obr. 3.9 Nastavování úhlu v ovládacím software zařízení UVP – Duo

Tyto dvě hodnoty jsou, jak se v průběhu času ukázalo, stěžejními hodnotami určujícími pravdivost výsledku. Bude o nich zmínka dále.



Obr. 4.0 Ukázka možností nastavení v ovládacím software zařízení UVP – Duo

## 4.1 Měřicí trať

Schéma měřicí trati je v příloze č. 2. Měřicí trať se skládala z čerpadla, jež čerpalo vodu ze spodní nádrže do nádrže horní. V horní nádrži byla udržována konstantní hladina za pomoci přepadu (není vyobrazen v příloze č. 2). Z horní nádrže vedlo ocelové potrubí o průměru DN 100, na němž bylo instalováno šoupátko pro možnost zastavení přívodu vody do samotného měřicího úseku. Za šoupátkem docházelo k redukci průměru z ocelového potrubí DN100 na potrubí PVC o vnitřním průměru 51 mm a šířce stěny 4,7 mm. Jeden metr od šoupátka byl instalován indukční průtokoměr KROHNE. A v místě 0.5 m za průtokoměrem bylo prováděno měření. Celá trať byla ukončena kulovým regulačním ventilem pro regulaci průtoku.

## 4.2 Postup měření

Po seznámení se se softwarem a sestavení měřicí trati, přišlo konečně na řadu první měření. Šlo o to zjistit, jak sonda reaguje na nastavení a jaký signál přijímá při měření bez zásahu do potrubí, tudíž přes stěnu plastového potrubí.

První měření tedy probíhalo tak, že byla zkoušena reakce sondy na různé úhly natočení vůči proudícímu médiu. Jako zkoušené médium byla použita voda. Průtok byl nastaven na hodnotu 0,4 l/s. Sonda reagovala dle předpokladů. Jakmile byla nastavena do polohy kolmo na proudění, tedy úhel z obrázku 3.9 byl nastaven na hodnotu 0°, měřené hodnoty ležely na ose a byly nulové. Což byl očekávaný průběh, protože žádná složka vektoru rychlosti se nepromítla do akustické osy převodníku. Při natočení sondy pod obecným úhlem od 0° do 30° sonda detekovala poměrně silný signál. Vždy když se hodnota úhlu dostala na hodnotu cca 40°, začal se signál ztrácet. Samozřejmě záleželo také na tom, zda je sonda natočená po proudu či nikoliv. Pro první měření byly v softwaru nastaveny hodnoty rychlostního rozsahu jako symetrické. Z toho důvodu se zobrazovaly profily jak v kladných hodnotách rychlosti, tak v záporných. Pokud je sonda natočena proti směru proudící kapaliny, jsou hodnoty v záporné oblasti rychlostního diagramu (závislost rychlosti na vzdálenosti). Pokud je sonda natočena po směru proudící kapaliny, jsou hodnoty kladné. Toto zjištění je důležité pro pozdější doladění nastavovaných hodnot rychlostního rozsahu.

Po zjištění funkčnosti sondy vyvstal problém s jejím uchycením a také s volbou metody pro měření. Jak je popsáno v první kapitole věnované metodě UVP, lze měřit buď destruktivně, tudíž zavedením sondy do proudu (ovlivnění proudu), nebo nedestruktivně. A to buď skrz potrubí, nebo přes něj.

Pro měření byla zvolena metoda, kterou firma Met – Flow SA uvádí jako jednu z hlavních výhod zařízení UVP monitoru, a to metoda měření přes potrubí. Tato volba se později ukázala jako ta nejhorší možná.

Sonda byla uchycena pomocí laboratorního stojanu a úhel byl odečítán úhломěrem.

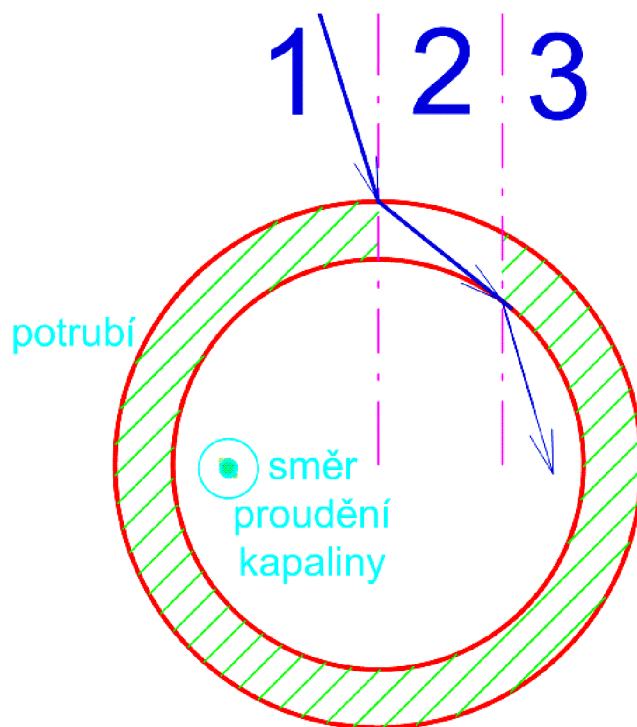
Nastavování hodnot při následujících měřeních vycházelo ze zjištění z prvních měření. Byly nastaveny hodnoty, při kterých byl při prvním měření přijímán převodníkem nejsilnější signál. Hlavním problémem celého nastavení ovšem byla hodnota rychlosti zvuku v daném prostředí. Vzhledem k tomu, že rychlost zvuku závisí na materiálu potrubí, tak bylo nutné zjistit materiálové charakteristiky daného PVC potrubí. Toto se

podářilo až tēsně p̄ed odevzdáním tēto p̄ace, takže v mēřeních byla hodnota rychlosti zvuku nastavena na 1482 m/s. Na místo rychlosti p̄epoētenē p̄es vzorce (2), (4) a (5). Rychlost zvuku v systēmu by se dala urēit i laboratornē, a to za použití teorie rāzu. Na použivānē mēřicí trati to ovšem bylo z bezpēdnostních dŮvodŮ neproveditelnē.

I p̄es vŮye zmínēnē chyby se vřak podařilo p̄i asi deseti mēřeních docílit pomērnē dobrých a podobných p̄ŮběhŮ, ovšem za použití vyhlazování. P̄i dalřích mēřeních a nastavení ůplnē stejných hodnot ať ůž p̄ŮtokŮ, rychlostí zvuku a ůhlŮ se ovšem nepodařilo p̄iblížit k namēřeným p̄ŮběhŮm. Jednou z mořností, p̄oē se nedařilo navázat na p̄edchozí mēření, je to, že sonda nemusela být umířtēna p̄esnē na stejnē místo jako p̄edchozí mēření, sonda nemusela ležet p̄esnē v ose potrubí a proto se p̄Ůběhy liřily.

Problēm tedy mohl být s nastavením ůhlu paprsku. Pro kombinaci PVC – voda nikde nejsou uvedeny doporuēenē rozsahy mēřicích ůhlŮ a hodnota ůhlu kritickēho. A tak se mohlo stát, že sonda byla nastavena pod ůhlem, který byl p̄esnē roven ůhlu kritickēmu či se mu velice blížil. Po změnē ůhlu se vřak mēření nezlepřilo. P̄i poēetnīm řeření velikosti kritickēho ůhlu vyvstal problēm s definiēním oborem funkce sin. Definiēní obor funkce sinus je od 0 (vēetnē) do 1 (vēetnē). VŮslednē hodnoty vŮpoētŮ ovšem vychāzely  $\sin(\theta) > 1$ , coř je z matematickēho hlediska nesmysl. Toto zjiřtēnī mŮže symbolizovat p̄āvē nemořnost mēření p̄es danē potrubí z PVC.

Za hlavní dŮvod neŮspēsného mēření byla tedy oznaēena volba mēření p̄es potrubí a s tīm související dēje ovlivŮující říření ultrazvukovēho paprsku. V kapitole 1 v podkapitolách 1.1.2 a 1.1.3 vēnovaných odrazu a lomu paprsku na rozhraní a absorpci je vysvētlení. Na obrāzku nīže (Obr. 4.1) je schematicky ukāzāno chovānī ultrazvukovēho paprsku.



Obr. 4.1 Chovānī ultrazvukovēho paprsku p̄i p̄Ůchodu potrubím

Nyní si popíšeme situaci, která podle mne nastává (Obr. 4.0). Ultrazvukový paprsek 1 je pod určitým úhlem vyslán do potrubí a média. Jenže se na rozhraní potrubí vzduch částečně láme a odráží. Odražený paprsek teď zanedbejme, předpokládáme, že převodník odraz od povrchu potrubí nezaznamená. Lomený ultrazvukový paprsek 2 se šíří materiálem potrubí. Jeho intenzita klesá vlivem absorpce prostředí až na rozhraní potrubí a kapaliny, zde opět dochází k lomu. Paprsek se opět láme a dostává se tak mimo akustickou osu převodníku.

Při průchodu ultrazvukového paprsku dochází k lomu či odrazu a absorpci. Tudíž je měření přes potrubí daleko složitější na provedení. Ultrazvukový paprsek může být vlivem lomu odkloněn mimo akustickou osu převodníku. To je obrovská komplikace, protože neměříme přímo daný paprsek, ale jenom šum od jeho lomů a odrazů na potrubí.

Za hlavní příčinu neúspěšných měření tedy byl označen právě tento jev (odraz, lom na rozhraních a absorpce), související s chybným výběrem metody měření. Řešením toho to problému je invazivní měření, při kterém je sonda v přímém kontaktu s proudící kapalinou, a tudíž nevznikají zbytečná rozhraní mezi médii. Další možností by mohla být změna průřezu měřeného potrubí z kruhového na obdélníkový.

## 5. Srovnání jednotlivých metod

Seznámení se s metodou PIV bylo poměrně náročné. Principy stereometrie jsou poměrně dobře pochopitelné oproti metodám vyhodnocování obrazových informací. Nicméně znalost samotného přesného vzorce pro vyhodnocování obrazové informace není úplně nutná k uskutečnění úspěšného měření. Materiály poskytované výrobcí jsou si vesměs hodně podobné, a tak je těžké v nich nalézt nové informace k tomuto problému.

Metoda LDA je jednou z nejstarších metod takto využívaných (od roku 1964), proto je k jejímu užití dostatečné množství různých podkladů, ze kterých jsou v této práci vypsány nejpodstatnější věci.

Jednotlivé techniky se porovnávají velice těžce. U metod PIV a LDA se nepodařilo získat údaje o rychlostním rozsahu měření. U metody PIV je tato hodnota závislá na schopnostech snímací kamery (na údajích fps). U metody UVP se podařilo získat hodnoty rychlostí, jež jsou uvedeny v tabulce (Tab 1.2). V porovnání s metodou PIV je metoda UVP vhodná spíše na aplikace, ve kterých není příliš vysoká rychlost proudění. Metoda UVP je také velice náchylná na vliv turbulencí v proudění. Například se nedoporučuje metodou single UVP (měření za pomoci jednoho převodníku) měřit rychlostní profil v koleni potrubního systému. Z aplikací, ke kterým je technika UVP vhodná, jmenujme například syntézu dvou látek. Jedná se o pomalý děj a zařízení UVP Monitor je schopno ukládat celou historii tohoto děje (pokud má harddisk PC dostatečnou kapacitu).

Z příkladů Užití metod PIV a LDA zjišťujeme, že jsou si metody velice podobné, přesto zde existují rozdíly. A to v prostorovém rozlišení, kde pro metodu LDA máme pouze „bodové“ měření nejčastěji a rozlišení má obecně velikost  $100\ \mu\text{m} \times 1\ \text{mm}$ . Zařízení PIV je schopno měřit celé pole a proto rozlišení závisí na měřeném objemu. Dalším rozdílem mezi metodami UVP, PIV a LDA je vyhodnocování frekvencí a princip měření. UVP stejně jako LDA měří přímo rychlost částic v kapalině rozptýlených. PIV ovšem pořídí snímek částic ve dvou časech a vyhodnocuje posuvy. Hlavní výhodou metod PIV a LDA oproti metodě UVP je malá ovlivnitelnost měření. Převodník zařízení UVP je náchylný na vibrace, šíření ultrazvukového paprsku závisí na akustické impedanci apod.

Zařízení UVP má zase oproti konkurenčním metodám výhodu v možnosti měření systémů, do kterých není vidět. Ovšem opět musí být splněna podmínka vhodnosti kombinace materiálů, související s vlastnostmi ultrazvukového vlnění. Metoda UVP je více vhodná do průmyslového užití, i samotná konstrukce zařízení je uzpůsobeno na práci například při sledování chování vodních toků, odpadních vod apod. Výhodou metody UVP oproti ostatním metodám je, že může pracovat ve znečištěných kalných vodách, což LDA ani PIV nemohou.

Metody PIV a LDA se hodí spíše do laboratorních podmínek pro zkoumání vysokých hodnot rychlosti (kavitace, výtoky z trysek) a pro vizualizaci obtékání těles (aerodynamické tunely).



## 6. ZÁVĚR

První část práce, popisující metodu UVP, byla koncipována jako popis mého postupu při seznamování se s metodou UVP. Tudiž šlo vůbec o základní pochopení principů metody UVP, jakým způsobem je ultrazvukové vlnění generováno, jak se šíří prostředím a co se s ním při šíření děje. V části věnované převodníkům jsem se snažil poukázat na poměrně velkou škálu různých druhů převodníků a jejich poměrně široké spektrum použití. Úvodní část tedy velice úzce souvisí s kapitolou věnovanou zkušebnímu měření, protože pochopení základních principů je nezbytné pro uskutečnění zkušebních měření.

Při zkušebním měření se objevily problémy popsané v kapitole 4. Myslím si, že i tyto neúspěchy byly velice přínosné. Rád bych pokračoval v měření i do budoucna. Dalším krokem při měření bude dostat se sondou do potrubí a neovlivnit tím proud, tedy zařadit sondu takřka souběžně s okrajem potrubí. Má vize je taková, že do potrubí se vyvrtá díra (průměr 8 mm) a sonda se prostrčí a uchytí za pomoci o – kroužku. Tento návrh bude ještě nutné prokonzultovat vzhledem k tomu, že výška horní nádrže je cca 4 m působí na potrubí v měřeném úseku poměrně velký tlak. Pokud by tato verze neprošla, bude nutné vymyslet systém ukotvení sondy skrz potrubí, nejspíše skrze nějaké pouzdro na pevno uchycené k potrubnímu systému. Výhodou uspořádání s o – kroužky by byla možnost pohybu sondy (i když velice omezená) a tím pádem i jednodušší nastavení úhlu převodníku vůči proudící kapalině. Další variantou by mohlo být měření proudění s volnou hladinou ve zkušebním kanálu. Dále se mi podařilo získat video manuály k měřením se zařízením UDV od švýcarské firmy Signal Processing SA. To mi doufám pomůže provést úspěšné měření na UVP Monitoru. Následně bych se rád pokusil zjistit, jak je to tedy s měřením přes stěnu potrubního systému, ale to až po úspěšném zprovoznění zařízení UVP Monitor. Další věc, jež je potřeba řešit, je systém přesného uchycení sondy, možnost přesně nastavit úhel převodník - kapalina. Nabízí se elektronické řešení za pomoci krokového motoru či servomotoru.

V kapitolách č. 4 a č. 5 šlo o seznámení se s principy měření metodami PIV a LDA. Mým úkolem také bylo zjistit co nejvíce o použití těchto metod a o parametrech, jež limitu jí měření s danými zařízeními.

Celkově je tato práce průřezem základními metodami pro měření rychlosti v kapalinách. Část věnovaná metodě UVP by měla posloužit jako jakýsi jednoduchý návod pro začátečníky. Má posloužit k pochopení základních principů měření a základních možností nastavení zařízení UVP Monitor.

## 7. POZNÁMKY

- [1] Met - Flow SA. *UVP Monitor Model UVP - DUO with Software Version 3 : User's Guide*. Lusane : [s.n.], 2006. Reflection and refraction on iteface, s. 32.
- [2] Met - Flow SA. *UVP Monitor Model UVP - DUO with Software Version 3 : User's Guide*. Lusane : [s.n.], 2006. Reflection and refraction on iteface, s. 15.
- [3] Met - Flow SA. *UVP Monitor Model UVP - DUO with Software Version 3 : User's Guide*. Lusane : [s.n.], 2006. Reflection and refraction on iteface, s. 18.
- [4] Met - Flow SA. *UVP Monitor Model UVP - DUO with Software Version 3 : User's Guide*. Lusane : [s.n.], 2006. Reflection and refraction on iteface, s. 28.
- [5] JANÍK, Jaroslav. *MĚŘENÍ TURBULENTNÍCH FLUKTULACÍ RYCHLOSTI*. Ostrava : [s.n.], 2006. Převodníky a jejich vlastnosti, s. 66. Dostupné z WWW: <[www.338.vsb.cz/PDF/Janalik-Mereniturflukrychlosti.pdf](http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik-Mereniturflukrychlosti.pdf)>.
- [6] Met - Flow SA. *UVP Monitor Model UVP - DUO with Software Version 3 : User's Guide*. Lusane : [s.n.], 2006. Reflection and refraction on iteface, s. 98.
- [7] WILDES, Doug. *ULTRASONICS | matrixActive Matrix Array transducers* [online]. c2008 [cit. 2011-05-24]. Matrix transducers. Dostupné z WWW: <<http://www.ieee-uffc.org/ultrasonics/gallery/mxducers.asp>>.
- [8] Gulf X-Ray Services. *Technisonics UT Transducers* [online]. [200-?] [cit. 2011-05-24]. Contact Transducers. Dostupné z WWW: <[http://www.gulfxray.com/ut/Technisonics\\_UT\\_Transducers/technisonic\\_contact\\_transducers.jpg](http://www.gulfxray.com/ut/Technisonics_UT_Transducers/technisonic_contact_transducers.jpg)>.
- [9] GE Measurement & Control Solutions. *Angle Beam Transducers Large Size* [online]. c2011 [cit. 2011-05-24]. GE Measurement & Control Solutions". Dostupné z WWW: <<http://www.ge-mcs.com/images/stories/ultrasound/main-angle-beam-large-transducers.jpg>>.
- [10] Kotzé R, et al. Measurement and analysis of flow behaviour in komplex geometries using the Ultrasonic Velocity Profiling (UVP) technique. *Flow Measurement and Unstrumentation* (2011), doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2010.12.010
- [11] Met - Flow SA. *Met-Flow: Transducers* [online]. 2009 [cit. 2011-05-24]. Transducers. Dostupné z WWW: <<http://www.met-flow.com/typo3temp/pics/74855da8b5.jpg>>.
- [12] Olympus Corporation. *Olympus NDT Atlas Transducers* [online]. c2011 [cit. 2011-05-24]. Atlas European Standard. Dostupné z WWW: <[http://www.olympus-ims.com/data/Image/panaCat/tr/atlasDuals\\_00047.jpg](http://www.olympus-ims.com/data/Image/panaCat/tr/atlasDuals_00047.jpg)>.

- [13] Uppsala University. *Transducer%20field*. [online]. [200-?] [cit. 2011-05-24]. Transducer field in water. Dostupné z WWW: <<http://www.signal.uu.se/Courses/CourseDirs/NDT2003/Transducer%20field.gif>> .
- [14] JANÍK, Jaroslav. *MĚŘENÍ TURBULENTNÍCH FLUKTULACÍ RYCHLOSTI*. Ostrava : [s.n.], 2006. Převodníky a jejich vlastnosti, s. 69. Dostupné z WWW: <[www.338.vsb.cz/PDF/Janalik-Mereniturflukrychlosti.pdf](http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik-Mereniturflukrychlosti.pdf)>.
- [15] LaVision GmbH. *Measurement Principle* [online]. [200-?] [cit. 2011-05-24]. System Components for Particle Image Velocimetry. Dostupné z WWW: <[http://www.piv.de/images/content/piv\\_components.jpg](http://www.piv.de/images/content/piv_components.jpg)>.
- [16] JANÍK, Jaroslav. *MĚŘENÍ TURBULENTNÍCH FLUKTULACÍ RYCHLOSTI*. Ostrava : [s.n.], 2006. Převodníky a jejich vlastnosti, s. 51. Dostupné z WWW: <[www.338.vsb.cz/PDF/Janalik-Mereniturflukrychlosti.pdf](http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik-Mereniturflukrychlosti.pdf)>.
- [17] SEIKA CORPORATION. *Principle of PIV | SEIKA CORPORATION* [online]. c2008 [cit. 2011-05-24]. Koncerto|Integrated Software for Flow and Combustion analysis. Dostupné z WWW: <<http://koncerto.biz/img/img-Displacement.gif>>.
- [18] SAKAKIBARA, J.; NAKAGAWA, M.; YOSHIDA, M. *Sakakibara Lab:Stereo PIV study of flow around a live swimming fish* [online]. 2004 [cit. 2011-05-22]. Stereo PIV study of flow around a live swimming fish. Dostupné z WWW: <<http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~sakakiba/papers/ExpFluids2004-fish.pdf>>.
- [19] Dantec Dynamics. *Particle image velocimetry (PIV) measuring device - Dantec Dynamics A/S* [online]. c2011 [cit. 2011-05-24]. Particle image velocimetry (PIV) measuring device. Dostupné z WWW: <[http://img.directindustry.com/images\\_di/photo-m2/particle-image-velocimetry-piv-measuring-device-407163.jpg](http://img.directindustry.com/images_di/photo-m2/particle-image-velocimetry-piv-measuring-device-407163.jpg)>.
- [20] LaVision GmbH. *LaVision - Tomographic PIV* [online]. [200-?] [cit. 2011-05-24]. FlowMaster Tomographic PIV. Dostupné z WWW: <[http://www.lavision.de/\\_we\\_thumbs\\_/946\\_2\\_Korea\\_1.jpg](http://www.lavision.de/_we_thumbs_/946_2_Korea_1.jpg)>.
- [21] *Efunda.com* [online]. c2011 [cit. 2011-05-24]. Interference of Two Plane Waves. Dostupné z WWW: <[http://www.efunda.com/designstandards/sensors/laser\\_doppler/images/interference\\_B.gif](http://www.efunda.com/designstandards/sensors/laser_doppler/images/interference_B.gif)>.
- [22] Dantec Dynamics. *Dantec Dynamics - laser optical measurement systems and sensors - FiberFlow LDA system* [online]. c2011 [cit. 2011-05-24]. FiberFlow 1D, 2D & 3D LDA System. Dostupné z WWW: <[http://www.dantecdynamics.com/Files/Billeder/Products\\_Services/Fluid\\_Mechanics/5probe5\[1\].jpg](http://www.dantecdynamics.com/Files/Billeder/Products_Services/Fluid_Mechanics/5probe5[1].jpg)>.

- [23] Dantec Dynamics. *Laser Doppler Anemometry - LDA* [online]. c2011 [cit. 2011-05-25]. Laser Doppler Anemometry - measurement principles. Dostupné z WWW: <[http://www.dantecdynamics.com/Files/Billeder/Products\\_Services/Fluid\\_Mechanics/bristol-245x214.jpg](http://www.dantecdynamics.com/Files/Billeder/Products_Services/Fluid_Mechanics/bristol-245x214.jpg)>.
- [24] University of Wyoming. *UW Department of Mechanical Engineering: Aeronautics Laboratory* [online]. c2011 [cit. 2011-05-25]. . Dostupné z WWW: <<http://www.eng.uwyo.edu/mechanical/uwal/images/LDAExpt.jpg>>.
- [25] Met - Flow SA. *Met-Flow: Hardware* [online]. 2009 [cit. 2011-05-25]. Hardware. Dostupné z WWW: <[http://www.met-flow.com/uploads/RTEmagicC\\_image1.jpg.jpg](http://www.met-flow.com/uploads/RTEmagicC_image1.jpg.jpg)>.
- [26] Met - Flow SA. *UVP Monitor Model UVP - DUO with Software Version 3 : User's Guide*. Lusanne : [s.n.], 2006. Reflection and refraction on iteface, s. 102.
- [27] Met - Flow SA. *UVP Monitor Model UVP - DUO with Software Version 3 : User's Guide*. Lusanne : [s.n.], 2006. Reflection and refraction on iteface, s. 103.

## 8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- ČVUT | Katedra zdravotního a ekologického inženýrství [online]. c2007 [cit. 2011-05-22]. ČVUT Fakulta stavební, Katedra zdravotního a ekologického inženýrství. Dostupné z WWW: <<http://www.biomechanika.cz/projects/43>>.
- Dantec Dynamics. *Dantec Dynamics - laser optical measurement systems and sensors - LDA measurement principles* [online]. c2011 [cit. 2011-05-22]. Laser Doppler Anemometry - measurement principles. Dostupné z WWW: <<http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=1046>>.
- Dantec Dynamics. *Dantec Dynamics - laser optical measurement systems and sensors - PIV measurement principles* [online]. c2011 [cit. 2011-05-22]. Particle Image Velocimetry measurement principles. Dostupné z WWW: <<http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=1049>>.
- Dantec Dynamics. *Stereoscopic PIV* [online]. 2010 [cit. 2011-05-21]. Dostupné z WWW: <[http://www.dantecdynamics.com/Admin/Public/DWSDownload.aspx?File=%2fFiles%2fFiler%2fsupport\\_and\\_download%2fresearch\\_and\\_education%2fStereoscopic\\_PIV\\_educational\\_slide\\_show.ppt](http://www.dantecdynamics.com/Admin/Public/DWSDownload.aspx?File=%2fFiles%2fFiler%2fsupport_and_download%2fresearch_and_education%2fStereoscopic_PIV_educational_slide_show.ppt)>.
- DURST, F.; MELLING, A.; WHITELAW, J. Principles and Practicles of Laser Doppler Anemometry. In *Laser Doppler Anemometry [LDA]* [online]. Massachusetts: Academic Press, 1981 [cit. 2011-05-25]. Dostupné z WWW: <[http://web.mit.edu/fluids-modules/www/exper\\_techniques/](http://web.mit.edu/fluids-modules/www/exper_techniques/)>.
- JANÍK, Jaroslav. *MĚŘENÍ TURBULENTNÍCH FLUKTULACÍ RYCHLOSTI*. Ostrava: [s.n.], 2006. 82 s. Dostupné z WWW: <<http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik-Mereniturflukrychlosti.pdf>>.
- Jensen, K. D. Flow measurements. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng.*, Dec 2004, vol.26, no.4, p.400-419. ISSN 1678-5878. Dostupné z WWW: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1678-58782004000400006&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-58782004000400006&lng=en&nrm=iso)>
- KANTOUSH, S. A. Flow field investigation in a rectangular shallow reservoir using UVP, LSPIV and numerical modelling. *Flow measurement and instrumentation* [online]. 2008, 19, 3-4, [cit. 2011-05-21]. s. 139-144. Dostupný z WWW: <[http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=MImg&\\_imagekey=B6V38-4R5F1RJ-1-1M&\\_cdi=5724&\\_user=835458&\\_pii=S095559860700088X&\\_origin=search&\\_coverDate=08%2F31%2F2008&\\_sk=999809996&view=c&wchp=dGLbVzz-zSkzS&md5=b6b006f55a1a51e960580c359d0078b9&ie=/sdarticle.pdf](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MImg&_imagekey=B6V38-4R5F1RJ-1-1M&_cdi=5724&_user=835458&_pii=S095559860700088X&_origin=search&_coverDate=08%2F31%2F2008&_sk=999809996&view=c&wchp=dGLbVzz-zSkzS&md5=b6b006f55a1a51e960580c359d0078b9&ie=/sdarticle.pdf)>. ISSN 0955-5986.
- *Laser Doppler Anemometry* [online]. [200?] [cit. 2011-05-22]. Theory. Dostupné z WWW: <<http://www.nat.vu.nl/environmentalphysics/REAL%20Experiments/LDA%20exp/LDA.html>>.

- LaVision. *Flow Master : Advanced PIV/ PTV Systems for Quantitative Flow Field Analysis* [online]. [s.l.] : [s.n.], [200?] [cit. 2011-05-22]. Dostupné z WWW: <[http://www.piv.de/images/content/brflow\\_new.gif](http://www.piv.de/images/content/brflow_new.gif)>.
- Met - Flow SA. *UVP Monitor Model UVP - DUO with Software Version 3 : user's guide*. Vyd. 6. Lausanne : [s.n.], 2006. 201 s.
- Met - Flow SA. *Met-Flow: FAQ* [online]. 2009 [cit. 2011-05-21]. FAQ. Dostupné z WWW: <<http://www.met-flow.com/index.php?id=8>>.
- Met - Flow SA. *Met-Flow: Transducers* [online]. 2009 [cit. 2011-05-21]. Transducers. Dostupné z WWW: <<http://www.met-flow.com/index.php?id=24>>.
- SAKAKIBARA, J.; NAKAGAWA, M.; YOSHIDA, M. *Sakakibara Lab: Stereo PIV study of flow around a live swimming fish* [online]. 2004 [cit. 2011-05-22]. Stereo PIV study of flow around a live swimming fish. Dostupné z WWW: <<http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~sakakiba/fish-e.html>>.
- SCHAUER, Pavel. *Vybrané statě z akustiky*. Brno : [s.n.], 2008. Energetické veličiny v akustice, s. 5-9. Dostupné z WWW: <[http://fyzika.fce.vutbr.cz/doc/vyuka\\_schauer/vybrane\\_state\\_z\\_akustiky.pdf](http://fyzika.fce.vutbr.cz/doc/vyuka_schauer/vybrane_state_z_akustiky.pdf)>.
- SEIKA CORPORATION. *Principle of PIV | SEIKA CORPORATION* [online]. c2008 [cit. 2011-05-22]. Koncerto[Integrated Software for Flow and Combustion analysis. Dostupné z WWW: <[http://koncerto.biz/Principle\\_of\\_PIV.html](http://koncerto.biz/Principle_of_PIV.html)>.
- Signal Processing SA. *FAQ on Ultrasonic Doppler Velocity Field Measuring Technique* [online]. 2011-04-12 [cit. 2011-05-22]. Frequently Asked Questions on UDV Technique. Dostupné z WWW: <[http://www.signal-processing.com/faq/faq\\_udv\\_frame.htm](http://www.signal-processing.com/faq/faq_udv_frame.htm)>.
- *Team - aktuálně* [online]. 2009 [cit. 2011-05-25]. Aktuálně. Dostupné z WWW: <[http://ateam.zcu.cz/download/ultrazvuk\\_2010.pdf](http://ateam.zcu.cz/download/ultrazvuk_2010.pdf)>.
- University of Wyoming. *UW Department of Mechanical Engineering: Aeronautics Laboratory - Facilities* [online]. c2011 [cit. 2011-05-25]. Facilities. Dostupné z WWW: <<http://www.eng.uwyo.edu/mechanical/uwal/facilities/lda.html>>.
- VIDIX-Visible Dynamics AB. *Fluid\_mech\_info* [online]. [200?] [cit. 2011-05-22]. Fluid Mechanics. Dostupné z WWW: <<http://www.vidix.se/frameset1.htm>>.

## 9. SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

Značka	Jednotka	Název
$c$	m/s	Rychlost zvuku
$c_{th}$	m/s	Teoretická rychlost zvuku
$D$	m	Vnitřní průměr potrubí
$E$	MPa	Modul pružnosti v tahu
$F_{prf}$	1/s	Opakovací frekvence pulzů
$f$	Hz	Frekvence zvuku
$f_0$	Hz	Vysílací frekvence
$f_d$	Hz	Dopplerovská frekvence
$f_c$	Hz	Vysílací frekvence
$K$	Pa	Modul objemové pružnosti kapaliny
$k$	-	Součinitel zohledňující materiál potrubí
$N$	m	Délka blízkého pole
$N_{rep}$	-	Počet opakování
$P$	Pa	Tlak
$P_{max}$	m	Maximální měřitelná hloubka
$p_r$	Pa	Intenzita odražené vlny
$p_i$	Pa	Intenzita dopadající vlny
$R$	-	Koeficient odrazu
$S$	m	Tloušťka stěny potrubí
$T$	-	Koeficient prostupu
$T_{měření}$	s	Měřicí čas
$\Delta T$	s	Časové rozlišení
$t$	s	Časová prodleva mezi vyslaným a přijatým signálem
$u$	m/s	Rychlost v daném bodě
$v$	m/s	Rychlost proudění
$v_{rozsah}$	m/s	Maximální měřitelný rozsah
$\Delta v$	m/s	Rychlostní rozlišení
$v_x$	m/s	Rychlost ve směru osy $x$
$v_y$	m/s	Rychlost ve směru osy $y$
$w$	m	Šířka měřicího kanálu
$x$	M	Vzdálenost převodníku a částice
$\Delta x$	M	Posunutí ve směru $x$
$\Delta y$	M	Posunutí ve směru $y$
$Z$	-	Akustická impedance média
$\gamma_0$	deg	Polo úhel divergence paprsku
$\lambda$	m	Vlnová délka
$\theta$	deg	Úhel dopadu ultrazvukové vlny
$\varphi$	deg	Úhel mezi dopadajícími laserovými paprsky
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Hustota prostředí

## **10. SEZNAM PŘÍLOH**

### **Příloha č. 1**

Tabulky divergence a délky blízkého pole v závislosti na frekvenci převodníku a aktivním průměru převodníku.

### **Příloha č. 2**

Obr. 4.2 Schéma měřicí trati.