

DIAGNOSTIKA VARHANNÍ PÍŠŤALY SLEDOVÁNÍM PROUDU VZDUCHU METODOU PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY

Martin Švejda

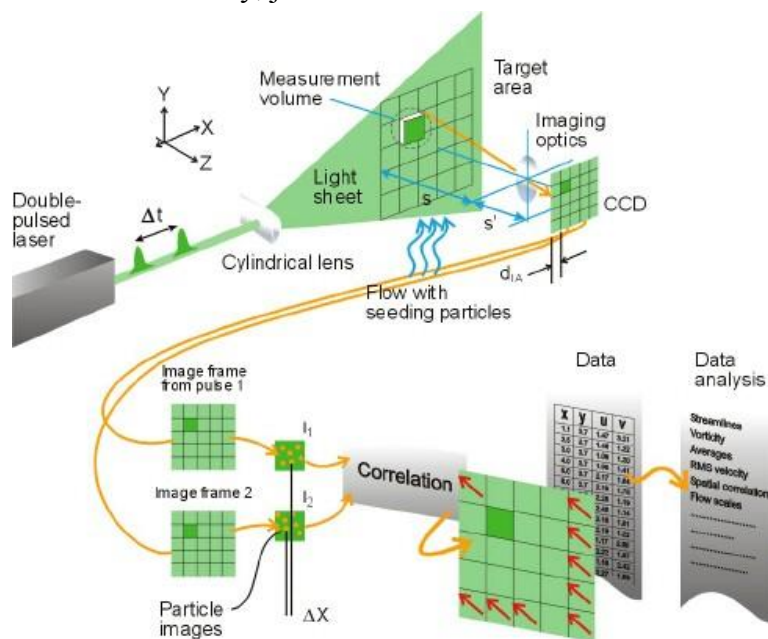
1 Úvod

Dominantním zdrojem zvuku u retné varhanní píšťaly je kmitající proužek vzduchu (vzdušný jazýček) v ústech píšťaly (labiu), jehož kmity ovlivňuje kmitající sloupec vzduchu uvnitř těla píšťaly (SYROVÝ, 2004). Proudění vzduchu v píšťale a v jejím okolí je tedy spjato se zvukem, který píšťala vytváří. Hlavním dlouhodobým cílem prezentovaného zkoumání vzduchového proudění je posouzení kvality restaurátorských zásahů píšťal, tedy vliv jejich mechanických vlastností na vzduchové proudění, které zvuk píšťaly vytváří.

Vzduchové proudění v různých částech retné, otevřené varhanní píšťaly bylo sledováno metodou Particle Image Velocimetry (určení rychlosti na základě snímků částic, dále jen PIV). V následujícím textu jsou předloženy výsledky těchto měření a popsána měřicí metoda, jakou byly získány. Práci uzavírá diskuze o tom, jakým způsobem je možné takové výsledky využít a kam bude směřovat další výzkum.

2 Použitá měřicí metoda

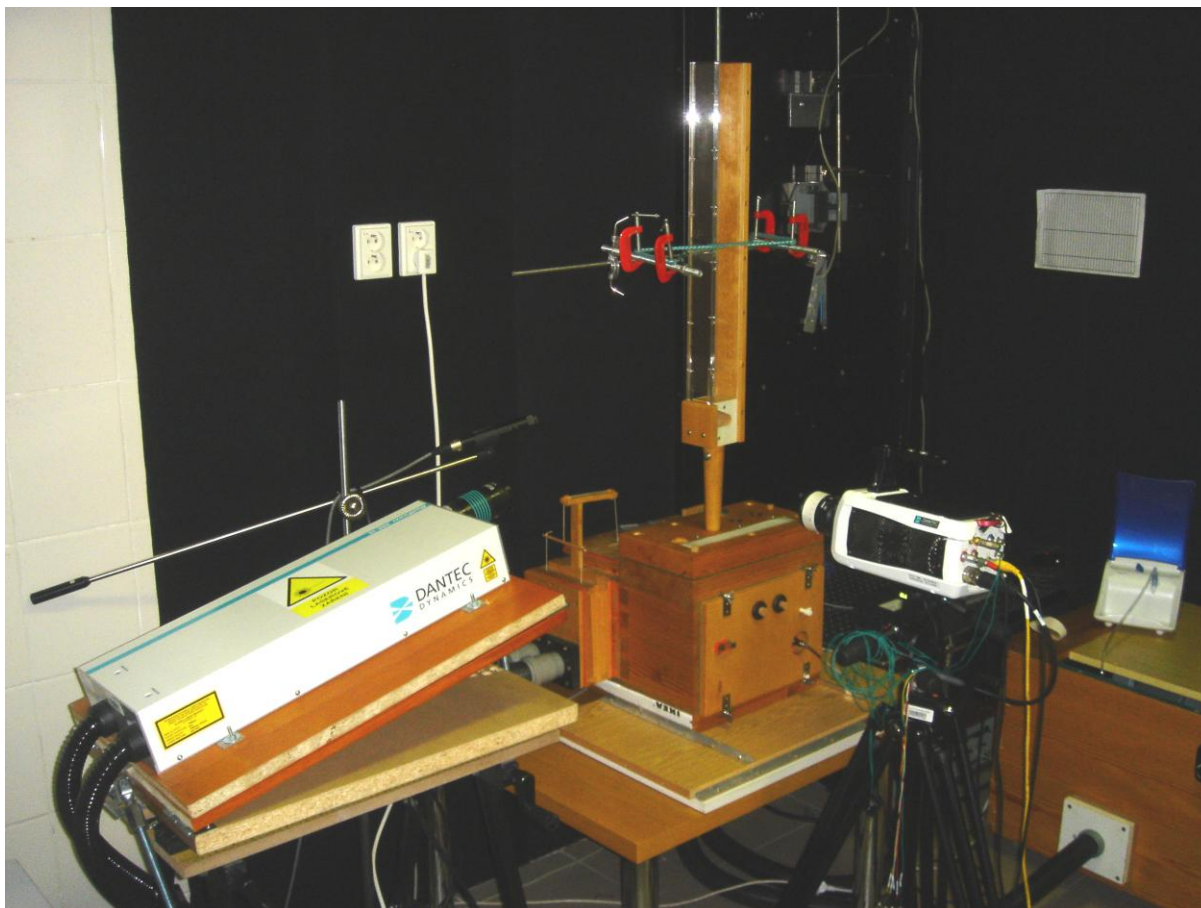
Autor použil pro vizualizaci vzduchového proudění v různých částech varhanní píšťaly metodu PIV. Schéma měřicí metody, je na Obrázku 1.



Obrázek 1. Schéma měřicího systému PIV. Převzato z (DANTEC DYNAMICS, 2014).

Měřená oblast před píšťalou byla osvětlována tenkým světelným kuzelem, který vzniká průchodem laserového paprsku válcovou čočkou. Laser (Litron Lasers Nano L 200-15) v nastaveném časovém intervalu dvakrát velmi krátce bliknul, čímž osvětlil vzduch, do kterého byly přimíchány reflexní částice. Vzduch byl do píšťaly vháněn elektrickým varhanním ventilátorem, který byl umístěn v uzavřené nádobě. Do této nádoby byly přivedeny reflexní částice generované výrobníkem mlhy (Safex F2010), který byl naplněn speciální kapalinou

(Safex inside nebelfluid power mix). Vysokorychlostní kamera (Phantom SpeedSense v611), která byla s laserem synchronizována prostřednictvím synchronizátoru (Dantec Dynamics 80N77 timer box), pořídila při každém ze dvou záblesků laseru jeden snímek. Na každém z dvojice snímků bylo zachyceno rozmístění částic. Mezi prvním a druhým zábleskem laseru se změnila jejich poloha. Interval mezi záblesky bylo třeba zvolit podle rychlosti proudění tekutiny. Vyhodnocovací software Dynamic Studio rozdělil podle hustoty částic snímky v páru na malé tzv. sledované oblasti (interrogation areas). Při následné analýze byla počítána korelace (míra podobnosti) mezi stejně situovanými oblastmi a oblastmi vzájemně posunutými v páru snímků. Posunutí, při kterém byla korelace mezi sledovanými oblastmi sousedních snímků nejvyšší, bylo vyhodnoceno jako nejpravděpodobnější směr pohybu částic ve sledované oblasti. Jelikož byl znám časový rozdíl mezi dvěma záblesky laseru, bylo možné určit kromě směru i rychlost tohoto posunutí. Výsledkem takové analýzy je vektorová mapa, ve které každý vektor určuje směr a posunutí shluků částic v dané sledované oblasti. Uvedený princip metody PIV je převzat z (DANTEC DYNAMICS, 2014). Autor využil k obsluze měřicího systému a vyhodnocení výsledků program Dynamic Studio v 3.41 od firmy Dantec Dynamics. Záběry byly vyhodnoceny modifikovanou korelační metodou Adaptive PIV, která je součástí programu. Snímek měřicího pracoviště je na Obrázku 2.



Obrázek 2. Snímek měřicího pracoviště

2.1 Fázové středování

Veškerá zde prezentovaná měření byla provedena na otevřené, retné experimentální varhanní píšťale, která je vyrobena z transparentního plexiskla a má frekvenci základního tónu 120 Hz.

Měřená píšťala je zachycena na Obrázku 3. Časový interval mezi laserovými pulzami autor nastavoval experimentálně tak, aby byl ve dvojici snímků co nejlépe detekovatelný pohyb reflexních částic. Tento interval se v závislosti na tom, v jakém konkrétním místě bylo vzduchové proudění zkoumáno, pohyboval v rozmezí (20 až 1000) μs . Frekvence, s jakou dovede laser opakovat dvojice pulzů, je ale omezená. Autor má k dispozici laser Litron Lasers Nano L 200-15 s maximální opakovací frekvencí 15 Hz, což odpovídá opakovací periodě přibližně 67 ms. Když bylo měření provedeno volně běžícím laserem, dvojice snímků na sebe nenavazovaly, docházelo k tzv. podzvorkování.



Obrázek 3. Měřená průhledná píšťala

Dominantní spektrální složka tónu píšťaly se v čase nemění, bylo tedy možné předpokládat, že i ve vzduchovém proudění bude obsažena stabilní složka. Tu lze, za předpokladu, že je děj stacionární, sledovat pořízením většího počtu snímků při konkrétní hodnotě časového posunutí vůči fázi periodického děje (stroboskopické zobrazení rychlého děje pomalým záznamem). Projevy náhodně se vyskytujících událostí (obvykle spojených s turbulencemi vzduchového proudění) pak lze ze záznamu eliminovat následným průměrováním získaných vektorových map (Fázové středování, URUBA, 2006).

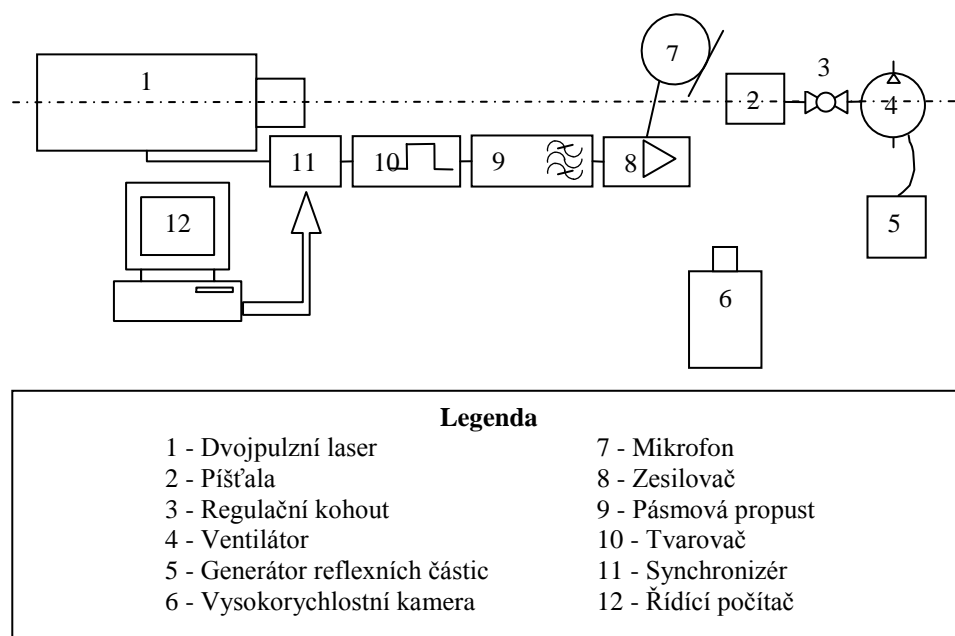
2.2 Synchronizace píšťaly

Akustický tlak vytvářený píšťalou byl mikrofonom (SENNHEISER KM-6P s předzesilovačem M-Audio DMP3) převeden na elektrický signál. Mikrofon byl umístěn v rovině dolního okraje labia ve vzdálenosti 30 cm od levé přední hrany píšťaly a jeho osa

ležela v rovině kolmé k ose píšťaly a procházela středem píšťaly a její levou přední hranou, aby nedocházelo k působení vzduchového proudění na membránu mikrofonu.

Pro získání věrohodných výsledků bylo třeba stanovit co nejpřesněji časový okamžik (spouštěcí událost), od které se měřila doba (požadovaná fáze), za kterou laser osvítí měřený systém a dojde k pořízení dvojice snímků.

Vzhledem k tomu, že základní tón píšťaly obsahuje další harmonické tóny a mikrofonem získaný signál obsahoval také další složky vzniklé provozním hlukem ostatních měřicích přístrojů (laser, ventilátor, generátor částic, kamera...), bylo třeba mikrofonní signál filtrovat pásmovou propustí (Brüel & Kjaer Spectrum shaper 5612), kterou projdou pouze frekvence blízké základnímu tónu píšťaly. Z důvodu co nejvyšší přesnosti byla spouštěcí událost definována jako náběžná hrana signálu, který vzniknul tvarováním mikrofonního filtrovaného sinusového signálu na obdélníkový tvarovačem (Lindos L102). Takto upravený signál byl přiveden na vstup synchronizátoru. Schéma celého měřicího systému je na Obrázku 4.



Obrázek 4. Schéma zapojení měřicího systému PIV

3 Získané výsledky

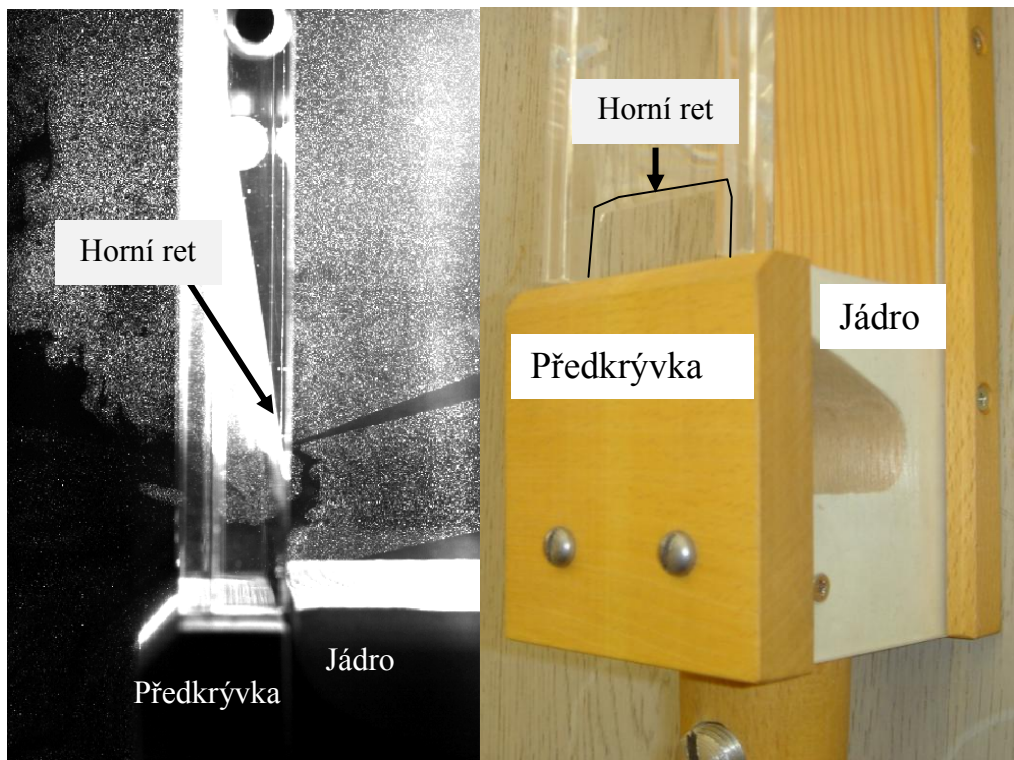
Píšťala byla měřena z různých pohledů v různých částech. Následuje několik získaných výsledků.

Pro každý pohled a každé z dvanácti časových posunutí vůči fázi základní frekvence zvukového signálu (stroboskopický záznam s postupnými posuny o 30°) bylo zachyceno 25 párů snímků vzduchového proudění. Následně byly vypočteny vektorové analýzy těchto párů (byla použita metoda Adaptive PIV, která je součástí obsluhujícího programu Dynamic Studio) a tyto analýzy byly zprůměrovány.

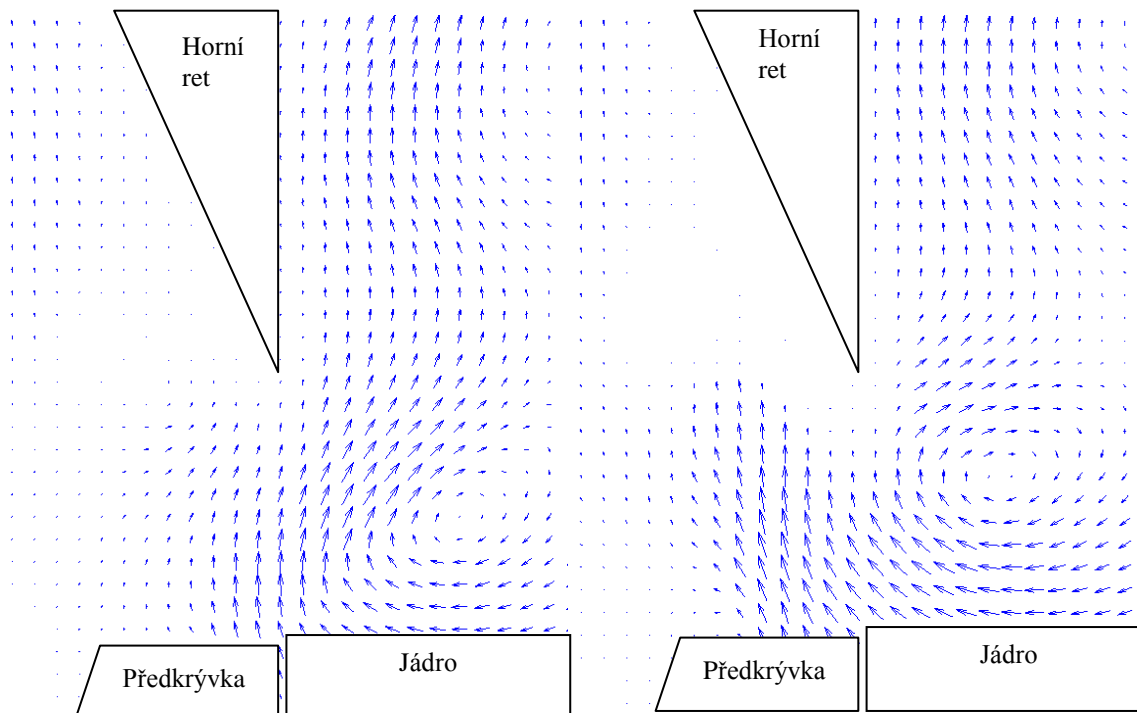
3.1 Záběry vzduchového jazyčku

Díky tomu, že je píšťala vyrobena z transparentního plexiskla, lze zachytit vzduchové proudění i uvnitř píšťaly. Všechny snímky jsou pořízeny makroobjektivem Nikon AF Micro-

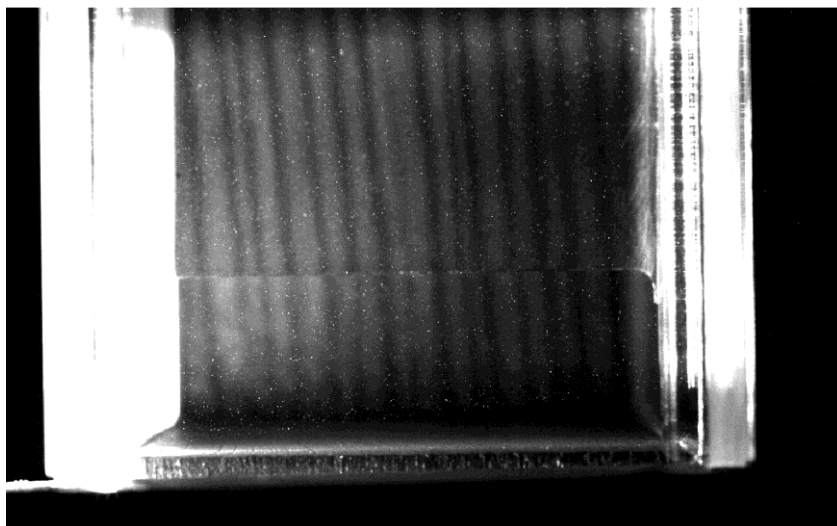
Nikkor 60mm f/2.8D. Na Obrázku 5 je zachyceno vzduchové proudění uvnitř labia (vzduchový jazýček píšťaly) z profilu. Na Obrázku 6 jsou vektorové analýzy vypočítané ze snímků vzduchového jazýčku ve fázích (60 a 120)°. Snímek vzduchového jazýčku uvnitř píšťaly zepředu je na Obrázku 7, na Obrázku 8 je pak uvedena analýza při fázi 0°.



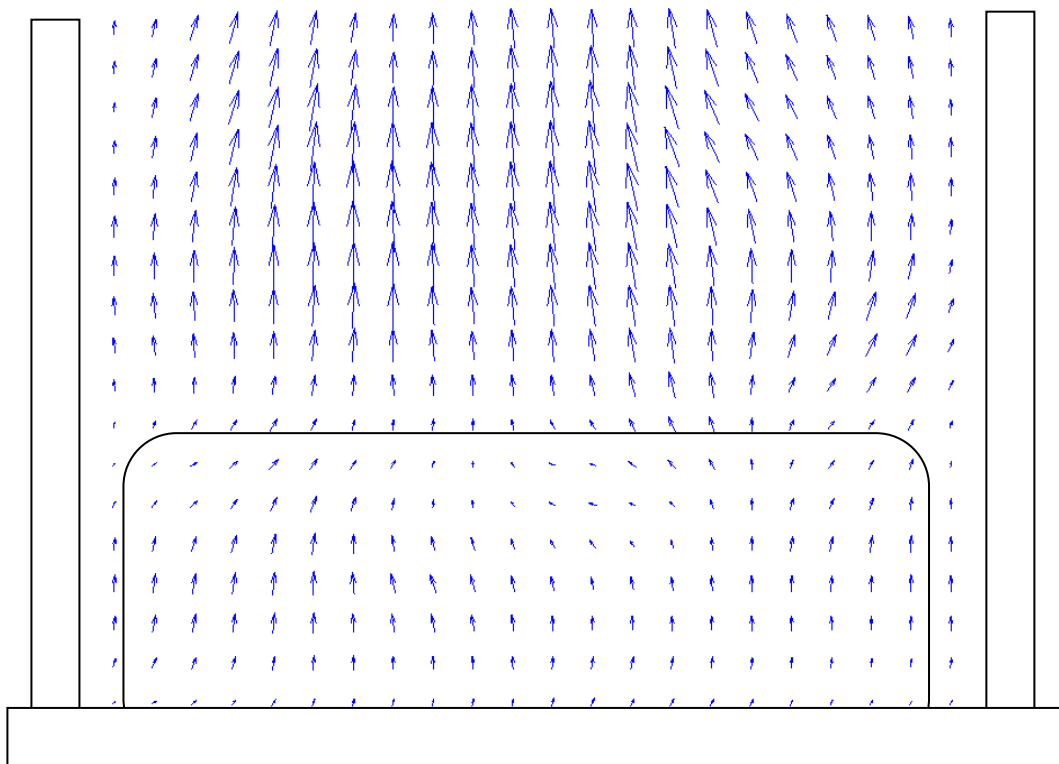
Obrázek 5. Vlevo pohled z profilu na vzduchový jazýček, vpravo popis částí píšťaly pro přehled. Černý trojúhelník vznikl stínem od hrany horního rtu.



Obrázek 6. Průměrované vektorové analýzy záběrů vzduchového jazýčku při 60° (vlevo) a při 120° (vpravo)



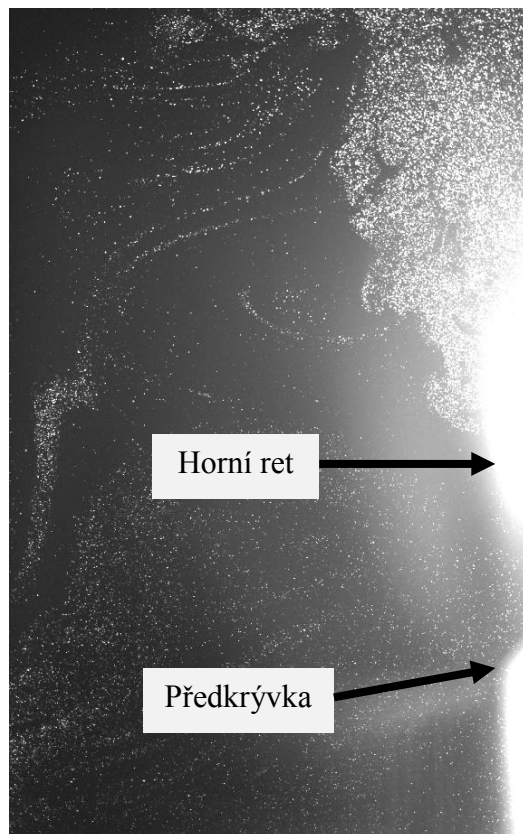
Obrázek 7. Záběr vzduchového proudění uvnitř píšťaly (pohled zepředu)



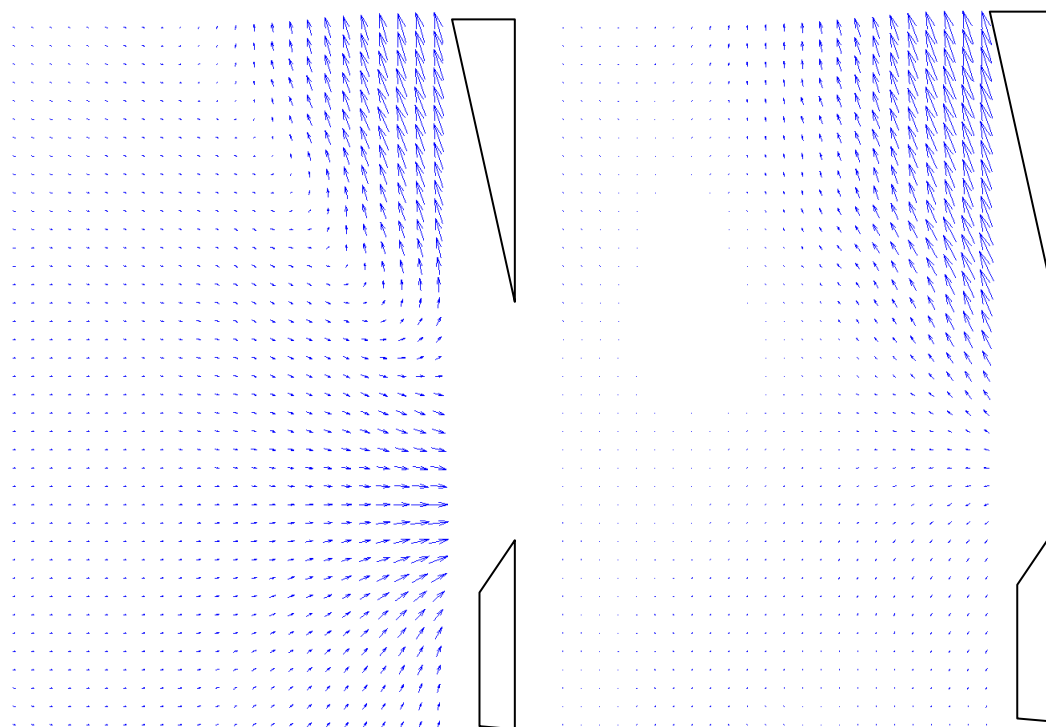
Obrázek 8. Průměrovaná vektorová analýza záběrů vzduchového proudění uvnitř píšťaly při 0°

3.2 Vzduchové proudění před píšťalou

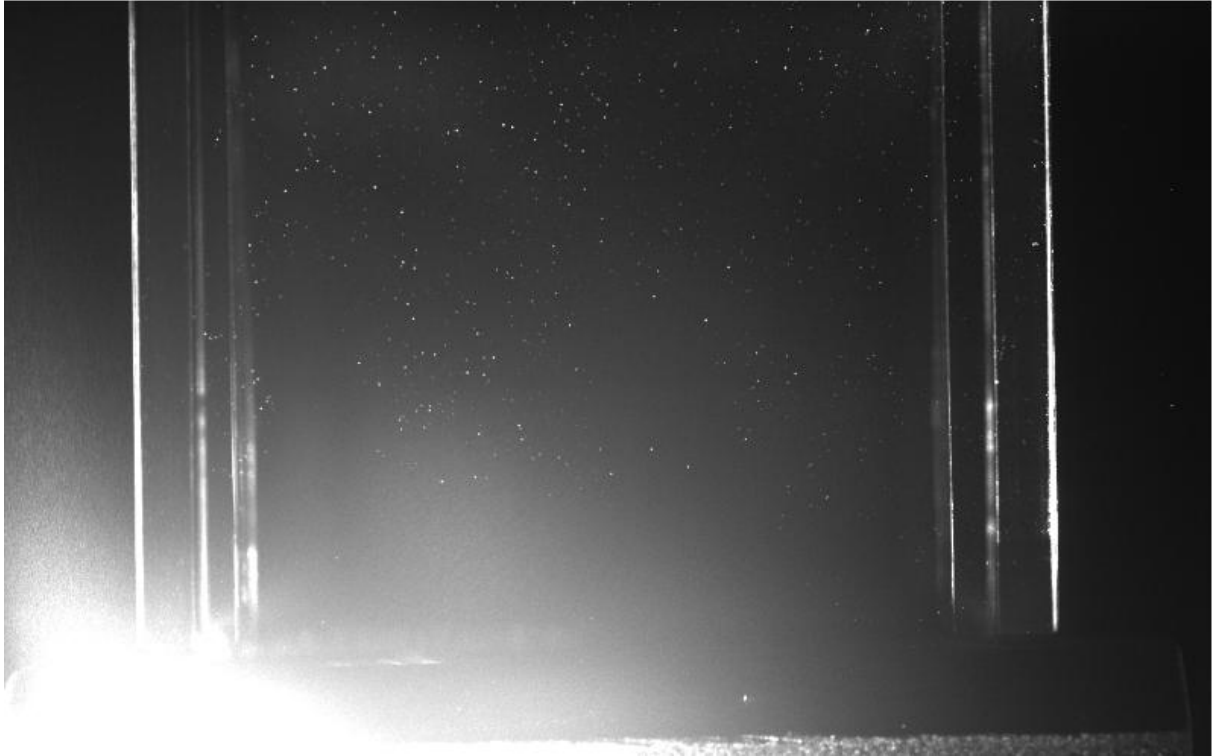
Na Obrázku 9 je zachyceno vzduchové proudění před píšťalou z profilu. Analýzy při 0 a 120° jsou na Obrázku 10. Na Obrázku 11 je zachyceno proudění před píšťalou zepředu, na Obrázku 12 pak analýza, kde je patrná nesymetrie mezi levou a pravou stranou. Tato nesymetrie je patrně způsobena tím, že hrana předkrývky píšťaly byla u měřené píšťaly nasazena nerovnoběžně s dnem píšťaly. Detail nasazení předkrývky je na Obrázku 13.



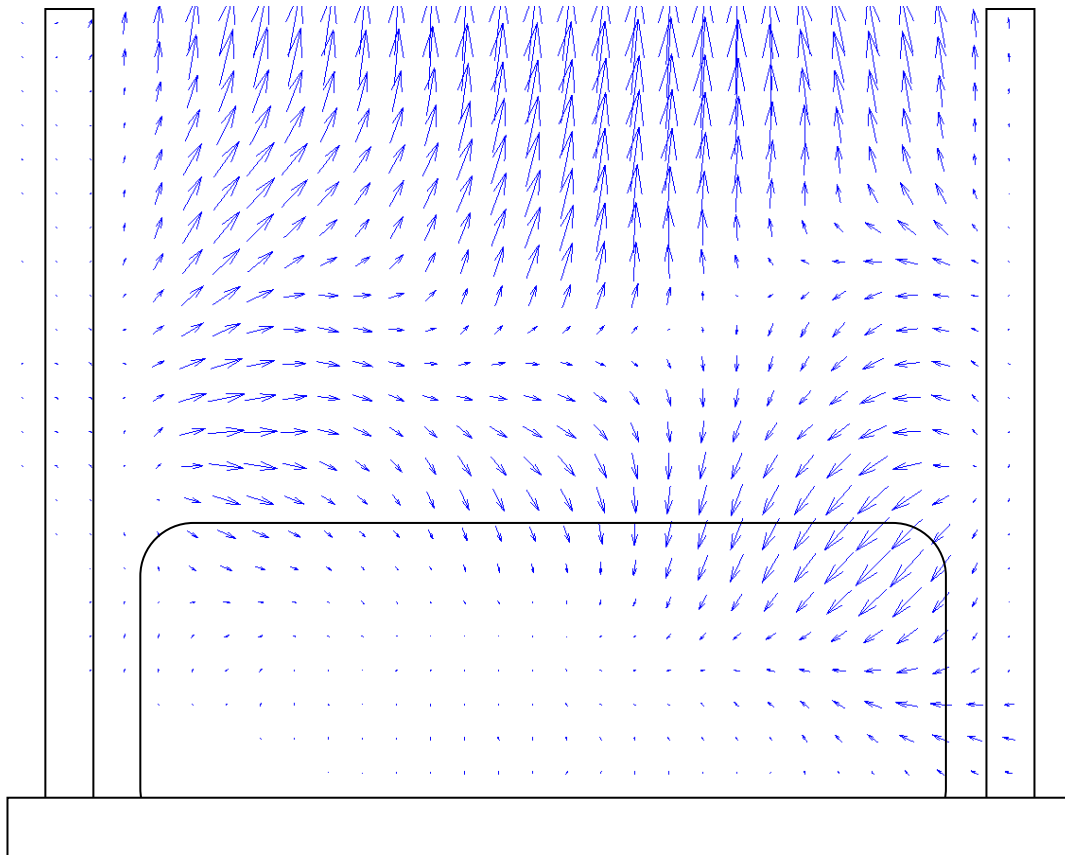
Obrázek 9. Vzduchové proudění před píšťalou (pohled z profilu)



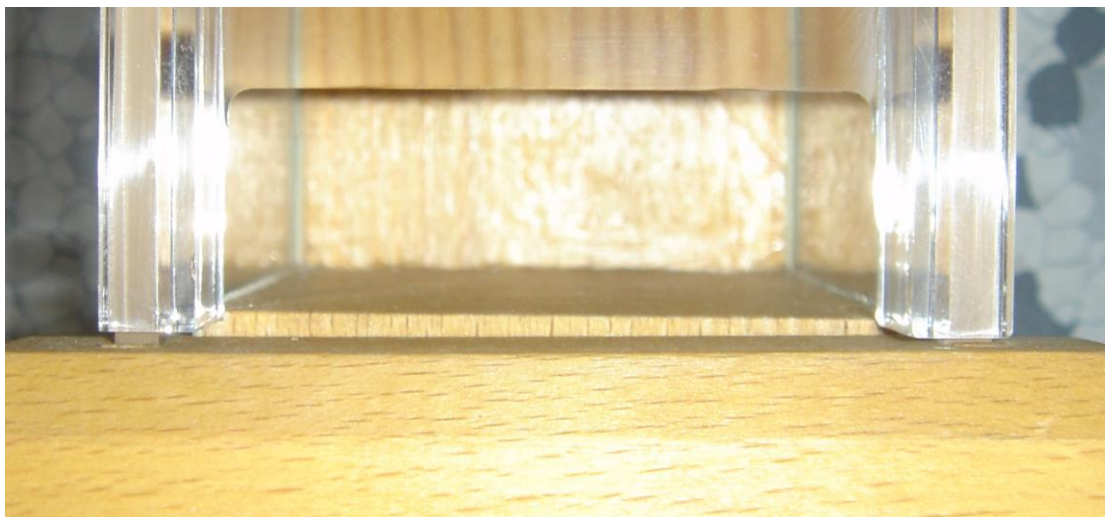
Obrázek 10. Průměrované vektorové analýzy záběrů vzduchového proudění před píšťalou (pohled z profilu), vlevo při 0°, vpravo při 120°



Obrázek 11. Vzduchové proudění před píšťalou (pohled zepředu)



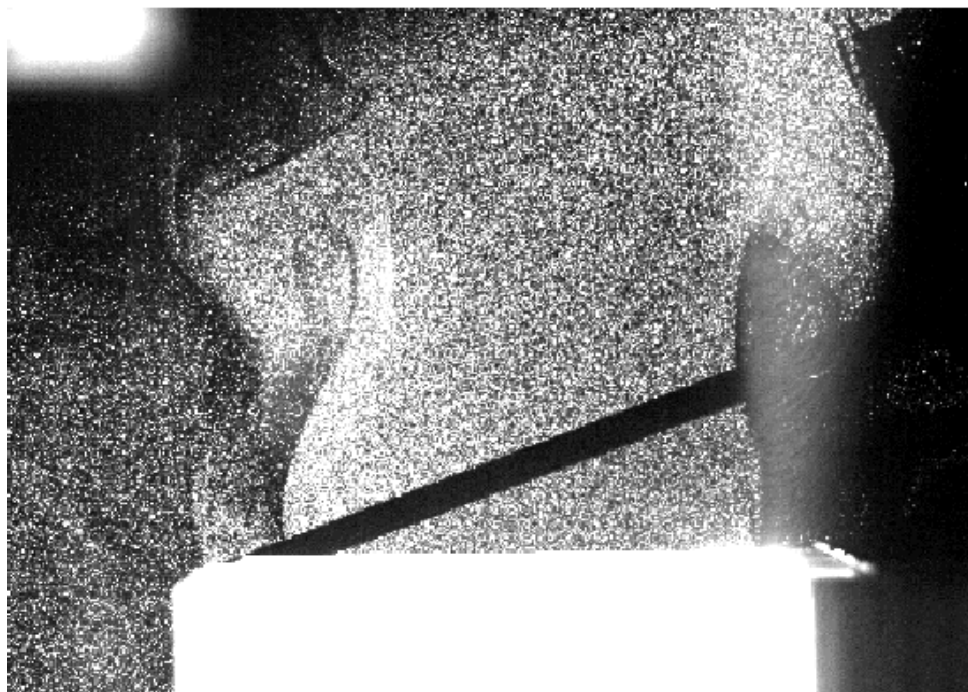
Obrázek 12. Průměrovaná vektorová analýza vzduchového proudění před píšťalou. Na této analýze je patrná nesymetrie, která je způsobena šikmým nasazením předkřívky.



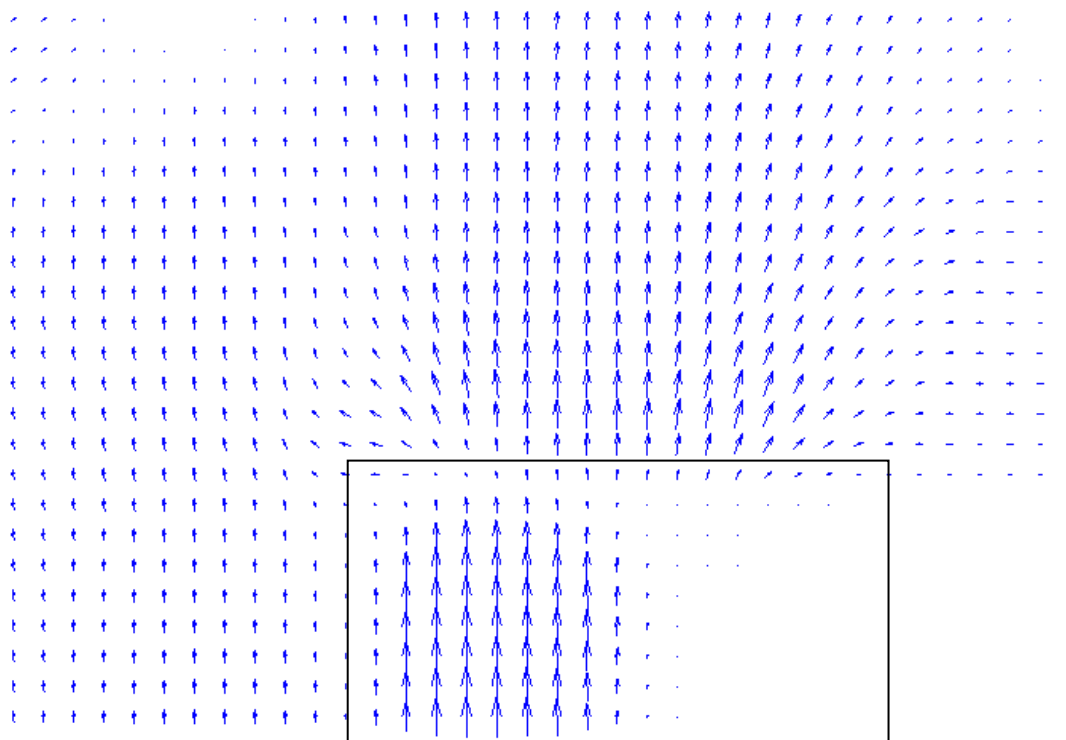
Obrázek 13. Předkrývka píšťaly není nasazena rovnoběžně s dnem píšťaly

3.3 Vzduchové proudění nad píšťalou

Na Obrázku 14 je zachyceno vzduchové proudění nad otevřeným koncem píšťaly z profilu. Na Obrázku 15 je vektorová analýza tohoto proudění při 0°.



Obrázek 14. Vzduchové proudění nad píšťalou (pohled z profilu). Černý pruh vznikl stínem vytvořeným přední hranou (vlevo) horního okraje píšťaly.



Obrázek 15. Průměrovaná vektorová analýza vzduchového proudění nad píšťalou při 60°

4 Diskuze

Ke sledování pohybu a vibrací vzduchu v různých oblastech před labiem, uvnitř a nad píšťalou byla použita metoda PIV. Vzhledem k omezené opakovací frekvenci laseru bylo použito fázové středování a měřen stabilní pohyb periodicky se opakujících trajektorií částic unášených prouděním vzduchu. Získané vektorové mapy ukazují schopnost metody dokumentovat ovlivnění tvaru trajektorií částic ve vzduchovém proudění a tedy i zvuku, který píšťala produkuje, mechanickými a materiálovými vlastnostmi píšťaly (v prezentované ukázce je např. dokumentována spojitost mezi symetričností vzduchového proudění před labiem a nerovnoběžností horní hrany předkryvky píšťaly). Jelikož prezentovaná studie měla za cíl jen nalézt vhodnou metodiku, zde uvedené příklady pouze ilustrují její vhodnost k sledování těchto vztahů. V návaznosti na prezentovanou úvodní etapu vývoje metodiky je již připraven další experimentální výzkum, který bude cílenou manipulací s mechanickými a materiálovými vlastnostmi píšťal systematicky dokumentovat jejich vliv na vibrace vzduchového jazýčku a vzduchového sloupce, vždy ve spojitosti s vnímaným zvukem.

5 Závěr

Pro autora práce bylo cílem zkoumání vzduchového proudění v různých částech píšťaly zpracovat metodiku, která umožní posoudit kvalitu restaurátorských zásahů varhanářů do píšťal. Tuto kvalitu lze samozřejmě posuzovat z hlediska zvuku, který píšťala vydává. Vizualizace vzduchového proudění poskytne navíc objektivní informaci, jaká mechanická vlastnost píšťaly zhoršuje kvalitu vytvářeného zvuku. Další výhodou vizualizace je, že je neinvazivní (nedochází k ovlivnění zvukového pole přidáváním mikrofonů). V navazujícím výzkumu se autor zaměří na získání vizualizací vzduchového proudění při manipulaci s mechanickými parametry píšťaly a též na získání vizualizací u většího počtu píšťal

podobných typů různého stavu a kvality, aby mohly být kvantifikovány různé charakteristiky vzduchového proudění uvnitř a v okolí píšťal.

Poděkování

Tato studie vznikla na Akademii múzických umění v Praze v rámci projektu "Zvuková kvalita" podpořeného z prostředků Institucionální podpory na dlouhodobý koncepční rozvoj výzkumné organizace, kterou poskytlo MŠMT v roce 2014.

Literatura

SYROVÝ, V. 2004. Kapitoly o varhanách. Praha: Akademie múzických umění. ISBN 80-7331-009-0

DANTEC DYNAMICS: Particle Image Velocimetry. (2014). [online]. [cit. 2014-25-08]. Dostupné na: < <http://www.dantecdynamics.com>>.

URUBA, V. 2006. Metody analýzy signálů při studiu nestacionárních jevů v proudících tekutinách. Praha: České vysoké učení technické.

Summary

Article presents the results of the PIV measurement of the airflow in different parts of the labial opened organ pipe and the methodology how they were acquired. It shows that the sound produced by the pipe is closely tied to the airflow in and in front of the pipe and that the airflow shape is tied to mechanical properties of pipe. The methodology was developed as an introduction to measurements on pipes with experimentally manipulated mechanical and material properties and to perform this measurement on a larger number of similar pipes to quantify which types of the airflow characteristics are related to which types of the sound features and disorders. The goal to use this quantification is to evaluate the different restoration interventions to organ pipes.

Contact address

Martin Švejda
Hudební a taneční fakulta
Akademie múzických umění v Praze
Malostranské nám. 13
118 00 Praha 1, česká republika
svejda.martin@seznam.cz
<http://zvuk.hamu.cz/vyzkumnecentrum.php>