VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

VIZUALIZACE RYCHLOSTNÍHO POLE ZA CHLADICÍM VENTILÁTOREM OSOBNÍHO AUTOMOBILU

VISUALISATION OF THE VELOCITY FIELD BEHIND THE COOLING FAN OF A PASSENGER CAR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. Vít Vrubel

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. Kamil Šebela

SUPERVISOR

BRNO 2024

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	**Bc. Vít Vrubel**
Studijní program:	Automobilní a dopravní inženýrství
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	**Ing. Kamil Šebela**
Akademický rok:	2023/24

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 diplomové práce:

Vizualizace rychlostního pole za chladicím ventilátorem osobního automobilu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Chlazení motoru vozu je nezbytné pro zajištění jeho spolehlivého a bezpečného provozu. S nástupem elektromobility je větší pozornost kladena na dimenzování chlazení v režimech jízdy nízkou rychlostí či při nabíjení, kde hraje velkou roli chladicí ventilátor kompaktního výměníku. Při návrhu chladicího systému se dnes neposuzuje pouze množství dodávaného vzduchu, ale také následné směřování vzduchu na výstupu z ventilátoru s cílem chlazení dalších komponentů vozu. Tyto návrhy probíhají standardně za pomocí virtuálního návrhu. Výpočetní modely je ovšem stále potřeba validovat pomocí experimentálních dat.
Diplomová práce se bude zabývat provedením měření rychlostního pole za ventilátorem pomocí sítě bavlnek a následnou vizualizací tohoto pole. Tato data budou dále využita pro validaci výpočetních modelů proudění.

Cíle diplomové práce:

Popište metody pro měření rychlostních polí vzduchu a zhodnocení použití těchto metod pro měření za ventilátorem kompaktních výměníků v automobilovém průmyslu.
Navrhněte experiment a proveďte měření na měřícím stavu určeném pro měření charakteristik chladicích modulů. Výstupem této části bude obrazový záznam.
Zpracujte obrazový záznam a vytvořte vektorové pole rychlostí v měřené rovině.

Seznam doporučené literatury:

TROPEA, Cameron; YARIN, Alexander a FOSS, John F. Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics. Berlin: Springer, 2007. ISBN 978-3-540-25141-5.

HUCHO, Wolf-Heinrich. Aerodynamics of Road Vehicles. Fourth. 4 th. Würzburg: Butterworth-Heinemann, 1987. ISBN 978-0-7506-1267-8. Dostupné z: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-1267-8.50002-6.

BASKAR, S. a RAJARAMAN, R. Airflow Management in Automotive Engine Cooling System - Overview. International Journal of Thermal Technologies. 2015, roč. 5, č. 1. ISSN 2277 – 4114.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce pojednává o vývoji programu a metodiky pro měření vektorového pole rychlostí za ventilátorem osobního automobilu pomocí obrazové analýzy a zaznamenávání pohybu bavlnek. V teoretické části jsou stručně popsány další metody pro měření vektorového pole v proudu plynů při nízkých rychlostech. Dále práce obsahuj výběr technických článků, které se věnují podobné problematice. V dalších kapitolách je obecný popis využívaného vybavení. Poslední část práce se zabývá návrhem měřícího stavu a vývoji programu pro samotné vyhodnocení. Na závěr proběhne zhodnocení metody a možný vývoj do budoucna.

KLÍČOVÁ SLOVA

obrazová analýza, vizualizace proudění, vektorové pole rychlosti, měření pomocí bavlnek

ABSTRACT

This thesis discusses the development of a program and methodology for measuring the velocity vector field behind the fan of a passenger car using image analysis and recording the movement of the tufts. The theoretical part briefly describes other methods for measuring the vector field in the gas stream at low speeds. Furthermore, the work contains a selection of technical papers dealing with similar issues is also presented. In the following chapters a general description of the equipment used is given. The last part of the thesis is devoted to the design of the measurement condition and the development of the program for the actual evaluation. Finally, an evaluation of the method and possible future developments are discussed.

KEYWORDS

image analysis, flow visualization, velocity vector field, tuft method

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VRUBEL, Vít. *Vizualizace rychlostního pole za chladicím ventilátorem osobního automobilu*. Online, diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství, 2024. Vedoucí práce Kamil Šebela. Dostupné z: https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157983.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Kamila Šebely a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 24. května 2024 ……..……..

Vít Vrubel

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval mému vedoucímu Ing. Kamilovi Šebelovi za vstřícný přístup a odborné vedení při zpracování této práce.

Dále chci poděkovat firmě Fluidea s.r.o. a jejich zaměstnancům za možnost pracovat na tomto tématu, za poskytnutí zázemí k práci, vedení a cenné rady.

Zvláštní dík patří mé rodině za podporu po celou dobu studia.

OBSAH

Úvod **11**

1 Metody pro měření rychlostního pole **12**
1.1 Mechanické anemometry 12
1.2 Tlakové anemometry 13
Více otvorové sondy 15
1.3 Termické metody 16
1.4 Metody laserové anemometrie 17
PIV 18
1.5 Bavlnkové sondy 20
1.6 Vyhodnocení vhodné metody 21

2 Odborné články na téma měření pomocí bavlnek **22**
2.1 Surface Flow Visualization on a Full-Scale Passenger Car with Quantitative Tuft Image Processing 22
2.1.1 Nastavení experimentu 22
2.1.2 Zpracování dat 23
2.1.3 Výsledky a závěr 23
2.2 Digitalization and Quantitative Flow Visualization of Surrounding Flow over a Specially-Shaped Column-Frame by Luminescent Mini-Tufts Method 23
2.2.1 Nastavení experimentu 23
2.2.2 Zpracování dat 24

3 Měřící stav **25**
3.1 Stav pro měření charakteristik ventilátorů 25
3.2 Ventilátor 25
3.3 Stav pro měření bavlnek 27
3.4 Kamera 28
3.5 Osvětlení 30
3.6 Okrajové podmínky 30

4 Vyhodnocování dat **32**
4.1 Obrazová analýza 32
4.2 Python 33
4.3 Knihovny 34
4.4 Vlastní proces 34
4.4.1 Pořízení video záznamu 34
4.4.2 Úprava jednotlivých snímků 35
4.4.3 Barevné modely 35
4.4.4 Redukce šumu a fragmentů 37
4.4.5 Skeletonizace 38
4.4.6 Hit or miss - tref či miň 38
4.4.7 Výběr bodů 40

5 Měření **42**
5.1 Výběr materiálu a délky nitě 42
5.2 Vliv počtu snímků 44

5.3 Souřadné systémy 46
5.4 Výsledky 47

Závěr 50

Použité informační zdroje 51

Seznam použitých zkratek a symbolů 55

Seznam příloh 56

ÚVOD

S rostoucím tlakem na snižování emisí při provozu aut, a tím pádem snižování aerodynamického odporu se dostávají do popředí témata a problémy, které se doteď přehlížely. Oblast zájmu se zaměřuje na jednotlivé detaily a cílem je pohyb automobilu co nejvíce zefektivnit. Jedním z nástrojů, jak toho docílit, je aerodynamika vozidla.

Proto začaly vznikat metody pro vizualizaci proudění. Aby bylo možné, co nejlépe popsat chování vzduchu obtékajícího automobil. Jednou z těchto metod je i metoda pozorování bavlnek, obvykle jsou připevněny na povrchu sledovaných objektů, pro získání informace o chování proudění v mezní vrstvě. Tato metoda byla dlouhou dobu pouze kvalitativního charakteru. Kdy výsledky byly vyhodnocovány pouze na základě lidského pozorování.

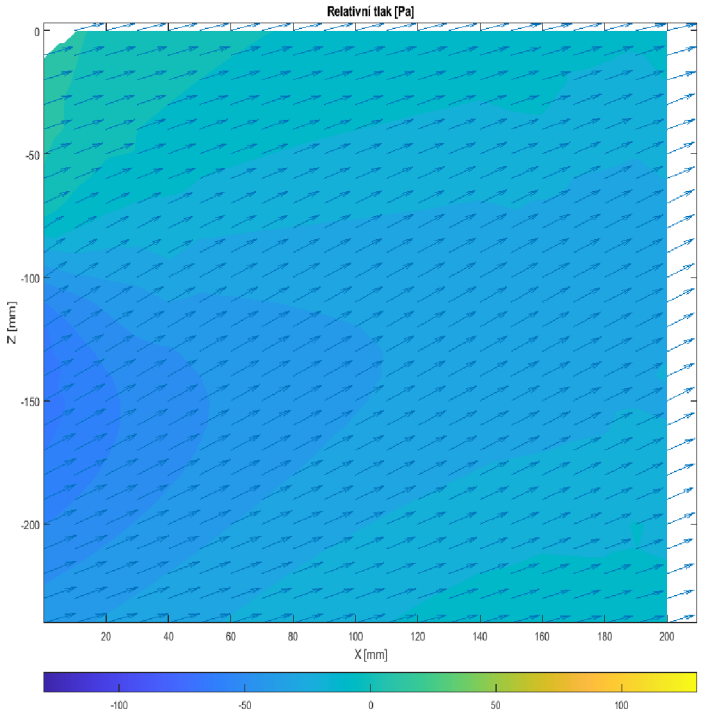
S rozvojem technologií a možností obrazové analýzy je nyní pohyb bavlnek možné zaznamenávat i pomocí techniky, a tím pádem kvantifikovat jejich pohyb a pohybové vzorce.

V automobilovém průmyslu již chladící ventilátor neslouží pouze ke zvýšení průtoku přes chladič, nýbrž se využívá například i k chlazení brzd a dalších systému. Při pomalé jízdě z kopce má na chlazení brzd zásadní vliv. Zároveň je i tato sestava chlazení uzpůsobena pro minimalizaci odporu. A to různými prvky, jakou jsou tzv. žaluzie, nebo otevírací klapky na ventilátoru. Proto vzniká požadavek na vizualizaci a měření proudění za ventilátorem.

I přes rychlý vývoj výpočetních softwarů pro proudění je zde stále potřeba jejich výsledky validovat a podložit je experimenty. Na trhu existují komerční metody na vizualizaci a měření vektorového pole v proudu vzduchu. Jejich výhody a nevýhody budou rozebrány v teoretické části této práce. Ovšem většinou je jejich aplikace podmíněna vlastnictvím speciálního vybavení a komplexního vyhodnocovacího softwaru. Cílem práce bylo ovšem vyvinout vlastní metodiku a program, který by dokázal získat kvantitativní informace o proudění vzduchu. Práce se věnuje zkoumání problematiky zaznamenávání pohybu bavlnek. Bude zde vysvětlen princip zpracování obrazu i způsob jakým lze data následně vyhodnocovat. Výstupem práce není jen vizuální záznam ale data, která je následně možné porovnat s teoretickými výpočty proudění nebo s dalšími metodami pro měření vektorového pole.

1 METODY PRO MĚŘENÍ RYCHLOSTNÍHO POLE

Rychlostní pole popisuje rozložení rychlosti v dané oblasti. Tedy takové vektorové pole, které obsahuje libovolný počet vektorů rychlosti v určeném prostoru viz *obr.* 1. Způsobů, jakými lze měřit vektorové pole je několik a budou zde popsány metody využitelné pro danou problematiku této práce. Tedy proudění vzduchu při nízkých rychlostech. Metody lze rozdělit do skupin podle způsobu měření. První skupina mechanických anemometrů funguje na principu působení silových účinku tekutiny na lopatky anemometrů. Další skupina funguje na bázi Dopplerova efektu jako je laserová anemometrie. Rychlost lze také měřit pomocí tlakových odběrů jako je Pitotova trubice a její odvozené varianty. Následovat bude metoda založená na principu ochlazování obtékaných tělísek známá jako termoanemometrie a bude zde i popsána metoda sledování bavlnek, která bude detailněji popsána na článcích věnovaných podobné problematice. Každá z výše zmíněných metod má své výhody a nevýhody a specifický druh výstupních dat, jenž se hodí pro různé typy aplikací. [2] [3]



Obr. 1 Vektorové pole s vyznačenými tlaky [1]

1.1 MECHANICKÉ ANEMOMETRY

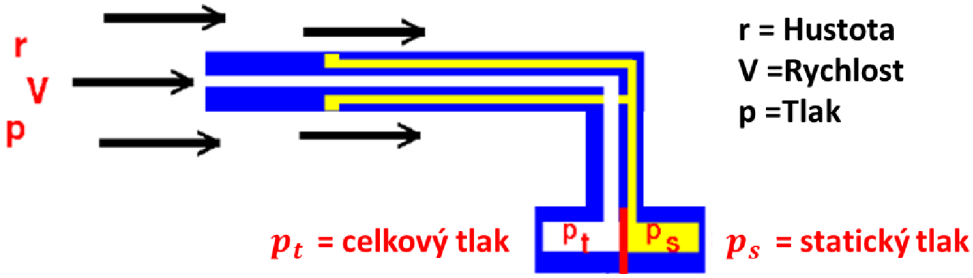
Princip, na kterém jsou založeny mechanické anemometry, je vesměs jednoduchý. Jde o přenos rychlosti proudění kapaliny resp. kinetické energie na mechanický pohyb. K tomu se využívá několika typů anemometrů. Jejich názvy jsou primárně určeny od jejich konstrukce. Prvním typem je miskový anemometr. Funguje na principu rozdílů tlaků, a to na třech až čtyřech ramenech uložených na otočné hřídeli, zakončené tzv. miskami. Tří misková varianta reaguje rychleji na změnu rychlosti proudění. Jejich vypouklá strana má mnohem nižší odpor nežli strana vydutá. A tím se anemometr roztáčí. Moment, který je vytvářen prouděním vzduchu roztáčí hřídel a z její rychlosti je pomocí jednoduchých vztahů zjištěna rychlost proudění větru. Tato základní varianta ovšem nedokáže určit směr proudění. Proto se může využívat i přídavná korouhev, která směr proudění ukazuje. Tento typ anemometru se využívá primárně pro meteorologii. Kde je daná citlivost zařízení dostačující.

Dalším typem mechanického anemometru je tzv. lopatkový. Princip je velmi podobný. Rozdílem oproti miskovému anemometru je jeho akční člen, který je tvořeny lopatkami neboli vrtulkou. Ta opět převádí rychlost proudění na otáčky hřídele z čehož je možné dopočítat rychlost. Hřídel s lopatkami musí být v tomto případě umístěna kolmo na směr proudění. Jinak by mohlo dojít k negativnímu ovlivnění měřených výsledků. Proto jsou tyto zařízení často vybaveny směrovým stabilizátorem. Tento typ se využívá v klimatizačních nebo vzduchotechnických zařízení jako stálý ukazatel rychlosti. Dá se využít také pro rychlou kontrolu u jednoduchých aplikací s předpokládaným laminárním prouděním. Typy anemometrů jsou zobrazeny na *obr. 2*. [5]

Obr. 2 Mechanické anemometry zleva: miskový, vrtulkový, lopatkový [4]

1.2 TLAKOVÉ ANEMOMETRY

Další skupinou anemometru jsou tlakové. Jak již vyplývá z názvu tato metoda je založena na rozdílu tlaků. Tento princip bude objasněn na Pitotově trubici, která se primárně přímo nepoužívá na popis rychlostních polí ale její deriváty na podobném principu ano. Rychlost proudění se vypočítává jako rozdíl tlaku celkového a tlaku statického. Jak funguje měření těchto dvou tlaků nejlépe ilustruje *obr. 3*. [6]



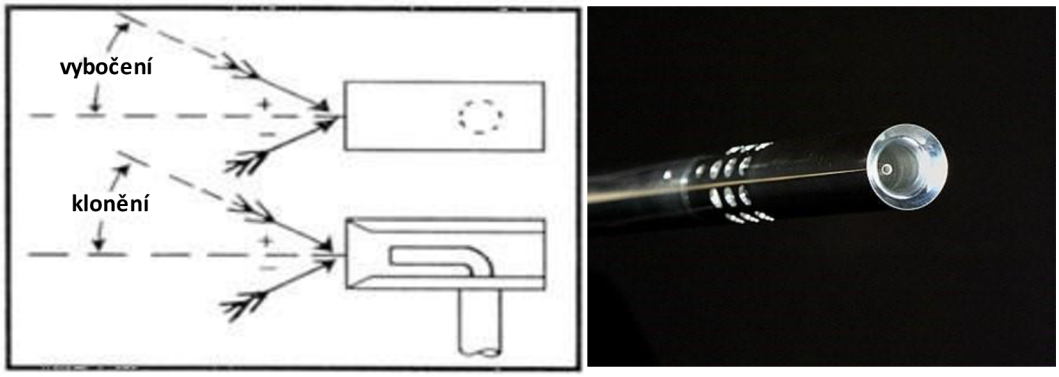
Obr. 3 Princip Pitotovy trubice [6]

Pitotova trubice je složena ze dvou trubic, které se liší směrem vyústění. Větší, bíle značená trubice, směřuje rovnoběžně na vektor proudění tekutiny a měří hodnoty celkového tlaku, jenž se skládá z tlaku statického a dynamického. Tato trubice je přímo ovlivňována rychlostí proudící kapaliny. Druhá, žlutě značená trubice, ústí kolmo na směr vektoru rychlosti a snímá statický tlak. Tedy nejsou přímo ovlivňovány rychlostí proudící kapaliny. Při znalosti teploty a tím pádem hustoty kapaliny lze dopočítat rychlost proudění. Pitotova trubice se využívá v mnoha aplikacích jako je letectví nebo ve větrných tunelech pro zjištění přesné rychlosti. Nevýhodou může být citlivost na úhel náklonu vůči směru proudění a při nízkých rychlostech může být rozdíl tlaků těžko měřitelný.

Pro měření rychlostního pole jsou ovšem vhodnější alternativy fungující na podobném principu.

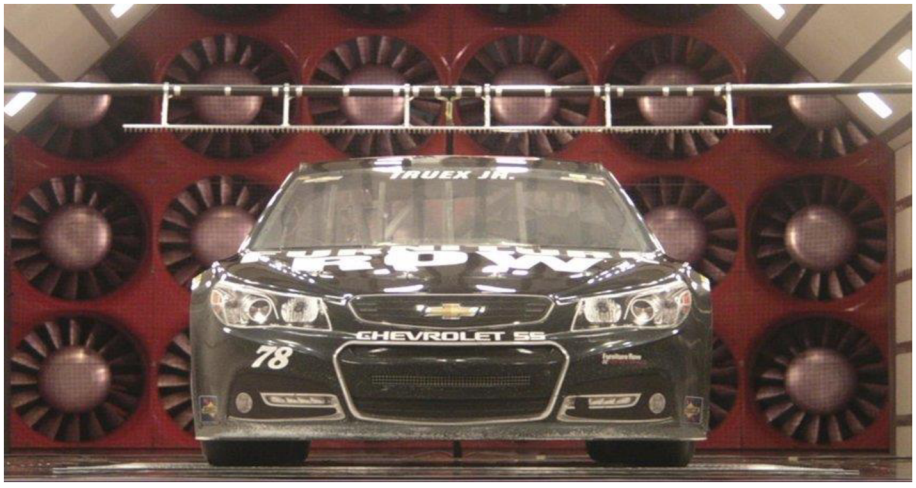
KIELOVA SONDA

Jednou z technologií využívanou pro měření tlakových bodů resp. rychlostí je Kielova sonda. Tato sonda funguje na podobném principu jako sonda Pitotova ale díky speciální konstrukci a krytování je mnohem méně náchylná na změnu úhlu náběhu, protože proudění je „narovnáno“ a to až do 30° klonění či vybočení. Detailní záběr na hlavici Kielovy sondy viz *obr. 4*. [7] [9]



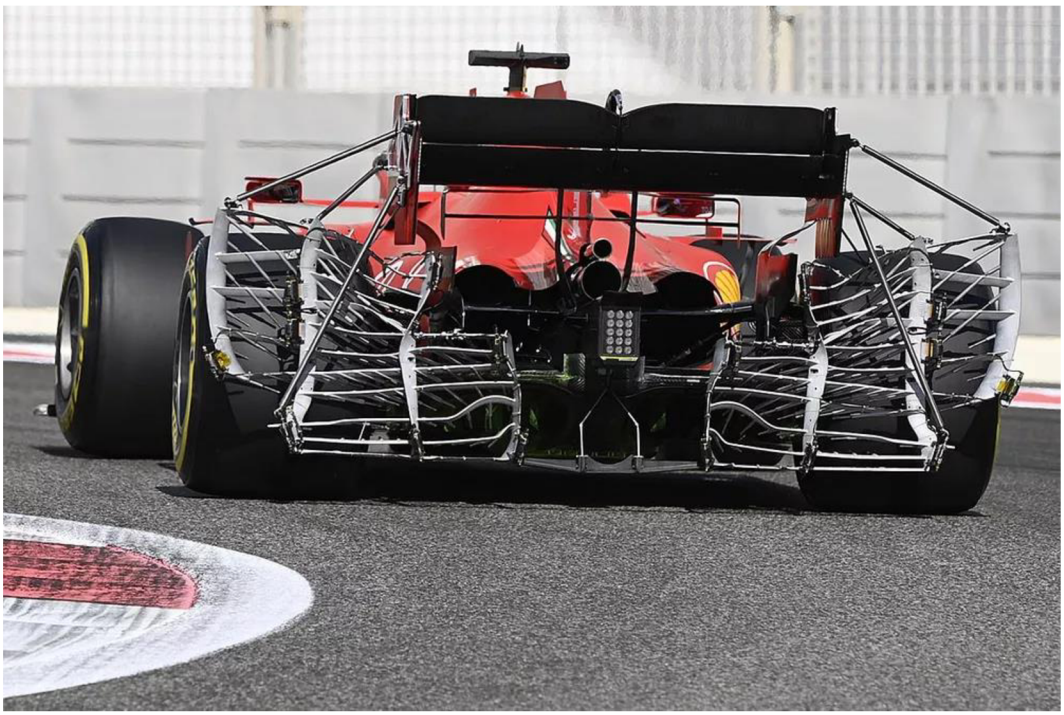
Obr. 4 princip Kielovy sondy [7] [9]

Díky této vlastnosti se využívají ve větrných tunelech pro měření proudového pole. K urychlení měření se používají soustavy sond, čítající i jejich desítky, které traverzují v měřeném prostoru viz *obr. 5*.



Obr. 5 soustava sond Kiel ve větrném tunelu [9]

K měření za reálných podmínek, se používá také soustava Kielových sond. Tyto soustavy jsou často velmi komplexní, aby co nejlépe odpovídaly předpokládanému směru proudění. Jejich nejčastější aplikaci můžeme vidět při validaci CFD dat přímo na trati na vozech F1 v období testů na počátku sezony viz *obr. 6*. [11]



Obr. 6 Sebastian Vettel, Ferrari SF1000 [10]

Kielova sonda jako taková neurčuje směr proudění, k měření těchto dat se používají 3D sondy neboli sondy více otvorové.

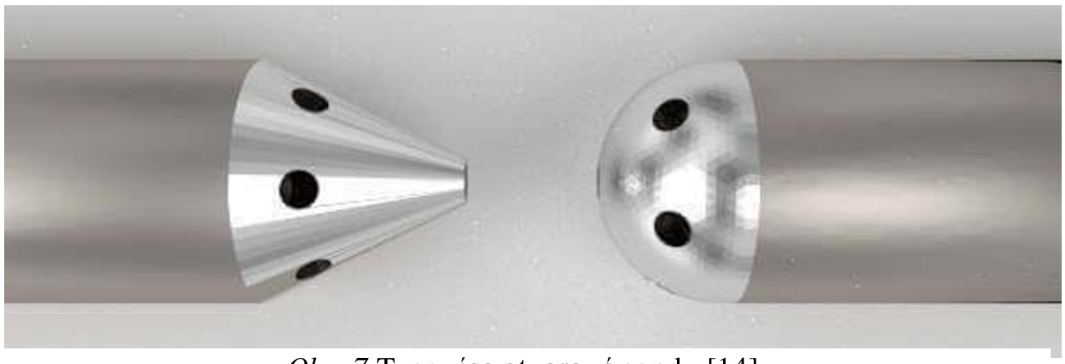
VÍCE OTVOROVÉ SONDY

Ty fungují na podobném principu jako Pitotova trubice s tím rozdílem, že mají mnohem větší rozmezí náběžného úhlu, a to podle počtu otvorů. Kdy Pitotova trubice funguje v intervalu od 0° do 10° a sondy s pěti nebo sedmi otvory až do 55° resp. 75° a poskytují informace o všech třech složkách rychlosti, zároveň se statickým a dynamickým tlakem a také dokáží poskytnout data o turbulentnosti proudění (viz. *obr. 7*).

Jejich výhodou je robustnost, například oproti metodě žhaveného drátku, kdy nejsou tak náchylné na poškození sondy. PIV naopak vyžaduje optický přístup a zanášení částic do proudu vzduchu. Navíc jsou více uživatelsky přívětivé a levnější. Nevýhodou zavádění sondy a měřící aparatury do proudu vzduchu může vést ke vzniku lokálních nebo dokonce globálních rušení. Sondy mohou mít kuželovitý nebo kulovitý tvar s třemi a až osmnácti otvory viz *obr. 7*. Přičemž již pěti otvorová sonda poskytuje veškeré informace o velikosti a poloze vektoru rychlosti v prostoru. Čím větší je počet otvorů tím větší je přesnost sondy při větších úhlech náběhu. Nejvíce využívané jsou ovšem pěti a sedmi otvorové sondy.

Na rozdíl od Pitotovy trubice sonda přímo neměří dynamický a staticky tlak. Což by nebylo možné, právě kvůli velkému rozsahu úhlů náběhu. V případě více otvorových sond je nezbytná kalibrace. Každá sonda musí být kalibrovaná zvlášť, protože i malé výrobní nepřesnosti by mohly mít vliv na výsledky měření. Sonda se během měření nenatáčí, a proto je potřebná směrová

kalibrace, cílem je určení směrových koeficientů. Ty jsou získány z rozdílů tlaků v jednotlivých otvorech pro různé směry proudění. Ze směrových koeficientů jsou následně vypočteny regresní funkce a ty slouží k určení úhlu náběhu, dynamického a celkového tlaku. Sondou se následně provádí traverzování, tedy průjezd sondou určitými místy v zájmové oblasti. Kde podle hustoty sítě odběrných bodu provádí měření. Tlakové rozdíly zpracovává tlakový převodník s dostatečným počtem kanálů, který odpovídá počtu otvorů sondy. [12][13]



Obr. 7 Tvar více otvorové sondy [14]

1.3 TERMICKÉ METODY

Jedná se o metody založené na změně elektrického odporu materiálu v závislosti na teplotě. Těleso, většinou se jedná o tenký kovový drátek, je žhaveno na mnohonásobně vyšší teplotu, než je teplota měřeného média, nejčastěji vzduchu. Zavedením ohřívaného tělesa do proudu vzduchu dochází k jeho ochlazování. Na to reaguje příslušný řídící obvod změnou napětí nebo elektrického proudu a lze tedy vyvodit závislost mezi změnou elektrické veličiny a hodnotou rychlosti kapaliny.

Zda se mění napětí nebo elektrický proud závisí od způsobu zapojení. Existují dva typy. Prvním je metoda konstantního proudu (CCA – Constant current anemometry) Kdy je hodnota elektrického proudu předem nastavena a v průběhu měření je udržována na stálé hodnotě. Ochlazováním tělesa dochází ke změně jeho teploty a odporu. To vede k vyvedení Wheatstonova můstku z rovnováhy a změnou napětí na operačním zesilovači. Změna napětí je mnohem lépe měřitelná nežli změna odporu. Při tomto způsobu měření je nutné měřit teplotu proudícího vzduchu, protože má vliv na ochlazování ohřívaného tělíska. Při tomto způsobu zapojení hrozí přepálení měřícího elementu, jelikož zde není řízení jeho teploty.

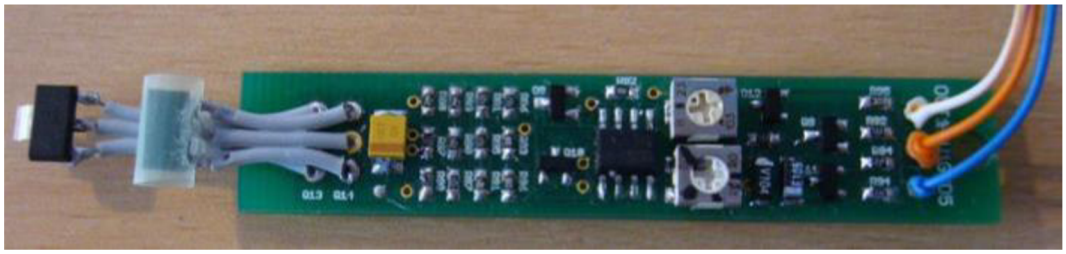
Druhým způsobem zapojení je založen na principu Konstantní teploty elementu (Constant Temperature Anemometry - CTA) tedy konstantní teplota elementu. To má za následek že s konstantní teplotou se nemění ani elektrický odpor. A jako proměnná zde funguje elektrický proud. Pokud nedochází ke změně teploty ani odporu Wheatstonův můstek je v rovnováze. Výhodou tohoto zapojení je vysoká frekvenční odezva, jednoduché ovládání. Nevýhodou je menší odolnost proti šumu.

Při konstrukci sondy je hlavním požadavkem velikost, aby nedocházelo k ovlivnění samotného proudění. Typické rozměry senzoru jsou 1,25 mm a průměr drátku 4-5 μm. Sonda je tvořena dvěma kovovými hroty, mezi nimiž je napájen obvykle wolframový drátek. Wolfram má dobré vlastnosti, co se tohoto použití týče a to teplotní odolnost, dobrou elektrickou vodivost a malý teplotní koeficient. V kombinaci s malou hmotnosti je dosaženo frekvenční odezvy až 50 kHz. Tím pádem je možné měřit i velmi turbulentní proudění. Pro získání všech složek rychlosti je pak nutné

využít více drátkové sondy. Dvou drátkové pro 2D a tří drátkové pro 3D měření. viz *obr.* 8. Před provedením měření se provádí kalibrace. Obvykle se využívá laboratorní kalibrátor, který poskytuje konstantní proudové pole s přesným nastavením rychlosti. Provádí se při několika rychlostech blízkých plánovanému experimentu. Naměřené hodnoty se proloží polynomem 4. stupně, a tak je zajištěn přepočet rychlosti na elektrickou veličinu. Při využíti více drátkových sond je ještě nutná směrová kalibrace pro získání koeficientů citlivosti pro klopení a klonění. Princip je podobný jako při více otvorových sondách. Měření musí probíhat v laboratorních podmínkách, protože nečistoty a částice unášené proudem vzduchu by sondy mohly poničit.[15][19]

Obr. 8 typy termických sond pro 1D, 2D, 3D [15]

Metodou založenou na podobném principu je také metoda žhavených elementů. Kde je místo drátku využito například rezistoru, diody, termočlánku PT100 nebo tranzistoru. K vysvětlení principu poslouží dvojce tranzistorů viz *obr. 9*. Jeden z nich slouží jako referenční, jeho teplota je shodná s teplotou okolí, na druhém je nastavena teplota vyšší. Vlivem obtékání vzduchu se ochlazuje. Vlastní vodivost polovodičů zajišťuje jejich otevírání a zavírání. Rychlost těchto změn odpovídá změnám elektrické veličiny a ta rychlosti proudění. Tato metoda se pyšní větší odolností oproti metodě žhaveného drátku.



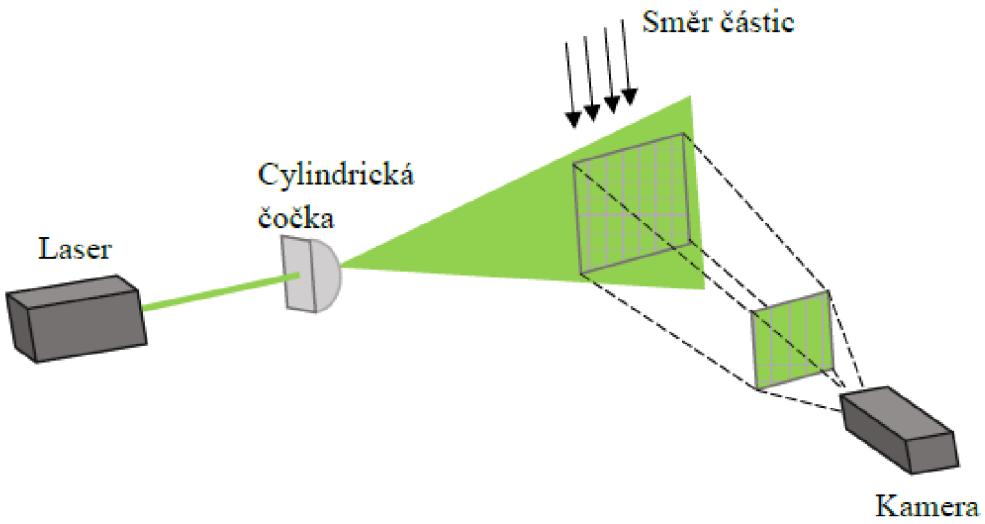
Obr. 9 Metoda žhaveného elementu – tranzistory [18]

1.4 METODY LASEROVÉ ANEMOMETRIE

Laserová anemometrie obsahuje metody, jež jsou založeny na optoelektronickém principu. Měření probíhá na základě optického pozorování média, do něhož jsou přidávány jemné částice, které neovlivní jeho vlastnosti, ale pomocí niž lze vizualizovat a vyhodnocovat jeho chování. Mezi tyto metody patří například PIV nebo LDA.

PIV

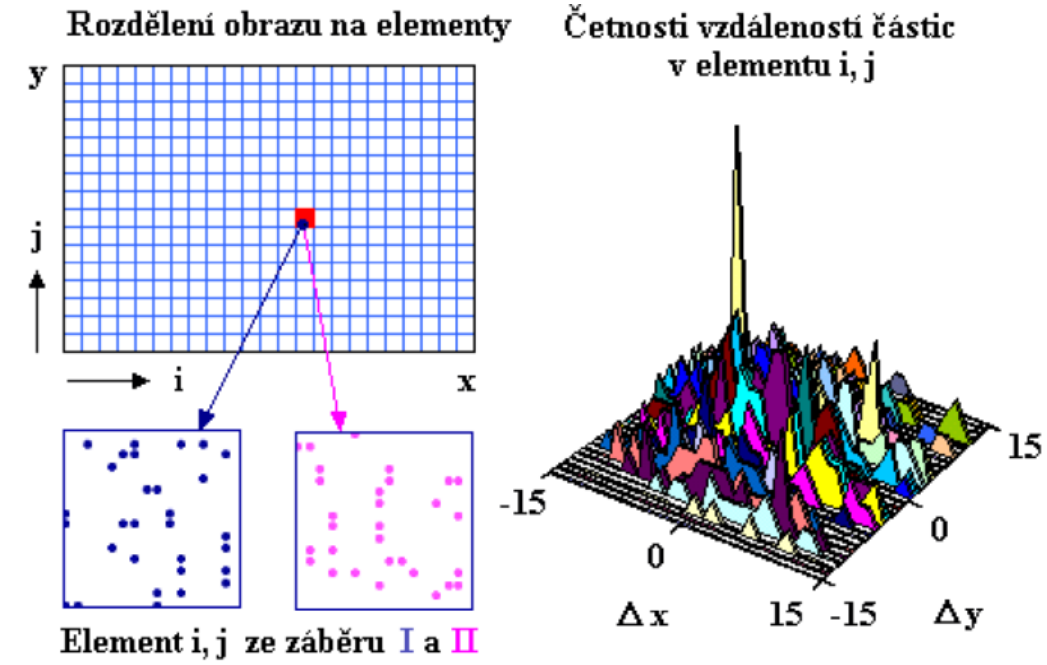
PIV je zkratka pro Particle Image Velocimetry neboli integrální laserová anemometrie, ta nám umožňuje pozorovat okamžitou distribuci rychlostí v dvourozměrném poli pohybující se tekutiny. Rychlost je určena z rozdílu polohy částice za daný časový úsek. Částice mohou být součásti kapaliny, ale ve většině případů je nutné je dodat. Které částice je možné zobrazit a zachytit záleží na světelném řezu. Ten je vytvořen pomocí výkonného laseru a soustavy optických prvků viz *obr. 10*. Zmíněny časový úsek je dán rychlostí světelných pulzů tedy jakým si stroboskopickým efektem vytvářeným laserem, ty umožňují zmrazení částic v čase a jejich zaznamenání pomocí kamery. Je tedy důležité, aby se poloha částic během záblesku co nejméně změnila Kamera je situována vždy kolmo na světelný řez, a tedy měřenou rovinu a pořizuje dva rychle jdoucí snímky za sebou. Vzdálenost a směr částic je pak následně vyhodnocen z rozdílů dvou po sobě jdoucích snímků. To poskytuje pouze rychlostní pole ve **2D**. K získání informace o rychlosti ve **3D** je nutné využít stereoskopického uspořádání. Kdy laserový řez sledují dvě kamery. Kamery mezi sebou svírají úhel pozorování 45°. Kromě rychlostního pole lze také získat informace o vířivosti nebo průtoku přes danou plochu. [23][24][26]



Obr. 10 Metoda PIV [23]

Existuje několik metod pro vyhodnocení posunu částic Dx a Dy. Běžnou praxí je rozdělit první i druhý obraz na elementy viz obr. 11, přičemž každý element představuje dostatečně malou část obrazu s dostatečným počtem obrazových bodů. Pokud se v elementu nachází jen jedna zřetelná částice, Dx a Dy lze snadno stanovit z rozdílu polohy částice v obraze II a obraze I. V případě, že je v elementu více zřetelných částic a každému je přiřazena poloha konkrétního obrazového bodu, Dx a Dy se vyhodnocují z četností vzdáleností mezi částicemi v obraze II a

částicemi v obraze I viz *obr. 11*.Výsledný posuv Dx a Dy v elementu je pak dán vzdáleností s nejvyšší četností. [22][23]



Obr. 11 Schéma k vyhodnocování posuvů částic [22]

Přesnějšího stanovení polohy částic v elementech (i mimo polohy obrazových bodů) lze dosáhnout postupným upřesňováním Dx a Dy po vyhodnocení posunu předchozím způsobem (dělením Dx a Dy až maximálně do stavu, kdy novému Dx a Dy odpovídá alespoň ještě dva body).

Nejčastěji se však Dx a Dy stanovují pomocí Fourierovy transformace, která je použitelná i v obecných případech, tj. pro špatně rozlišitelné částice, a dokonce i pro vizualizaci proudění pomocí kouře či mlhy.[22][23][26]

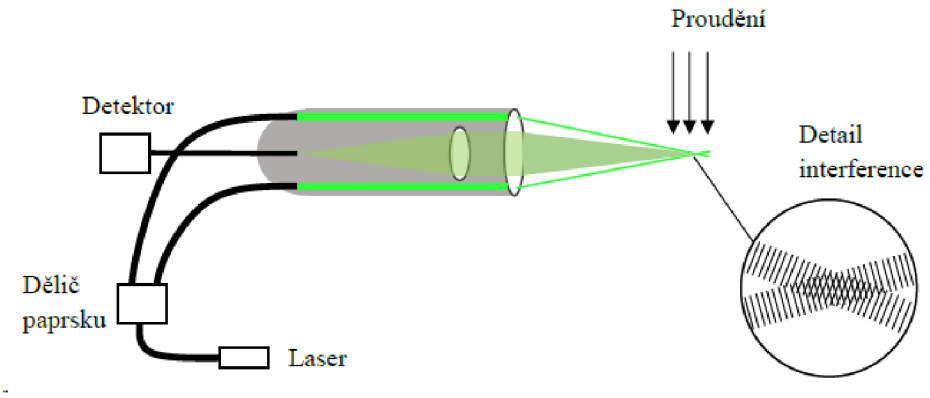
LDA

Metoda LDA (Laser-Dopplerova anemometry) je založena na principu Dopplerova jevu a slouží k měření rychlosti proudění tekutin. V principu metoda využívá dva nebo více laserových paprsků, které se v tekutině kříží a vytváří interferenční obrazec viz *obr. 12*. Pro měření je nutné, aby tekutina obsahovala pevné částice. Když taková částice prochází místem křížení paprsků, dochází k odrazu světla a vzniku Dopplerova posunu frekvence. Frekvenční změna odraženého signálu je následně detekována a vyhodnocena. Porovnáním frekvence vysílaného a odraženého paprsku se s využitím geometrie paprsků určí velikost dané složky rychlosti částice a tím i rychlost proudění v daném místě.

Metoda LDA se vyznačuje řadou výhod, které z ní činí oblíbený nástroj pro měření rychlosti proudění:

- **Neinvazivnost:** Měření probíhá bezkontaktně, aniž by docházelo k narušení proudění.
- **Vysoká přesnost:** Metoda LDA umožňuje dosahovat vysoké přesnosti měření, a to i v náročných podmínkách.

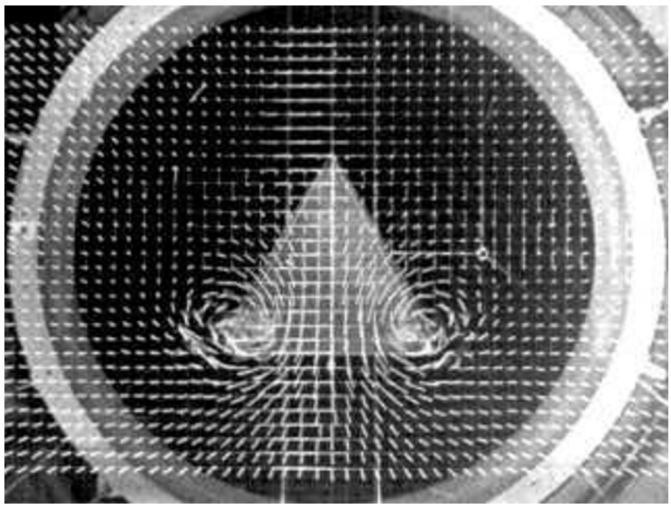
- **Možnost měření v extrémních podmínkách:** LDA lze použít pro měření v proudech s vysokými teplotami nebo v tekutinách agresivních vůči konvenčním senzorům.
- **Absolutní metoda:** LDA je absolutní metoda, která nevyžaduje kalibraci.[20][21][26]



Obr. 12 Metoda LDA [20]

1.5 BAVLNKOVÉ SONDY

Bavlnky neboli bavlnkové sondy nepředstavovali ve svém počátku metodu na měření vektorového pole, nýbrž primárně metodu vizualizace proudění využívanou jak v leteckých zkouškách, tak v testech v aerodynamickém tunelu. Jde o krátké kousky nití. Obvyklými materiály pro nitě jsou monofilní nylon, polyesterové nebo bavlněné šicí nitě. Pro lepší viditelnost při fotografování mohou být chomáčky pokryty fluorescenčními barvivy. Bavlnky se lepí na povrch modelu pomocí lepicí pásky nebo lepidla. Proudění vzduchu kolem modelu způsobuje jejich ohýbání a směřování po proudu. Pokud je celý model pokryt chomáčky, pak směr chomáčků indikuje oblasti silného příčného proudění, zpětného proudění nebo odtržení mezní vrstvy. Tato metoda se primárně používala pro vizualizaci proudění na povrchu obtékaných těles. Ovšem dá se využít i pravoúhlé drátěné mřížky, na které jsou v místě křížení upevněny nitě. Mřížka se umisťuje za obtékané těleso kolmo na směr proudu viz obr. 13. Na základě orientace nití na mřížce lze pak zkoumat proudění v úplavu za tělesem.[21] [25][26]



Obr. 13 Síť bavlnek za měřeným objektem [21]

1.6 VYHODNOCENÍ VHODNÉ METODY

Jako nejvíce vhodné metody pro validaci proudění za ventilátorem osobního automobilu bylo vybráno následujících pět metod. Jedná se o PIV, LDA, termoanemometrii (tří drátkové čidlo), více otvorová sonda a měření pomocí bavlnek. V tabulce (*tab. 3* viz přílohy) jsou zmíněny různá kritéria, který by mohla mít vliv na výběr metody. Ve společnosti Fluidea již proběhlo měření pomocí PIV a také pomocí více otvorové sondy. Proto byla zvolena metoda bavlnkových sond. Jako řešení, které není přímo komerčně dostupné, je relativně levné a nevyžaduje žádné speciální vybavení.

2 ODBORNÉ ČLÁNKY NA TÉMA MĚŘENÍ POMOCÍ BAVLNEK

V této kapitole je zpracována rešerše vybraných článků, které se věnují podobné problematice jako je tato diplomová práce. Byly vybrány práce, z nichž jsou zmíněny primárně části, věnující se měření a následného rozpoznávání, zpracování dat. Několik poznatků z těchto prací bylo využito i v této práci.

2.1 SURFACE FLOW VISUALIZATION ON A FULL-SCALE PASSENGER CAR WITH QUANTITATIVE TUFT IMAGE PROCESSING

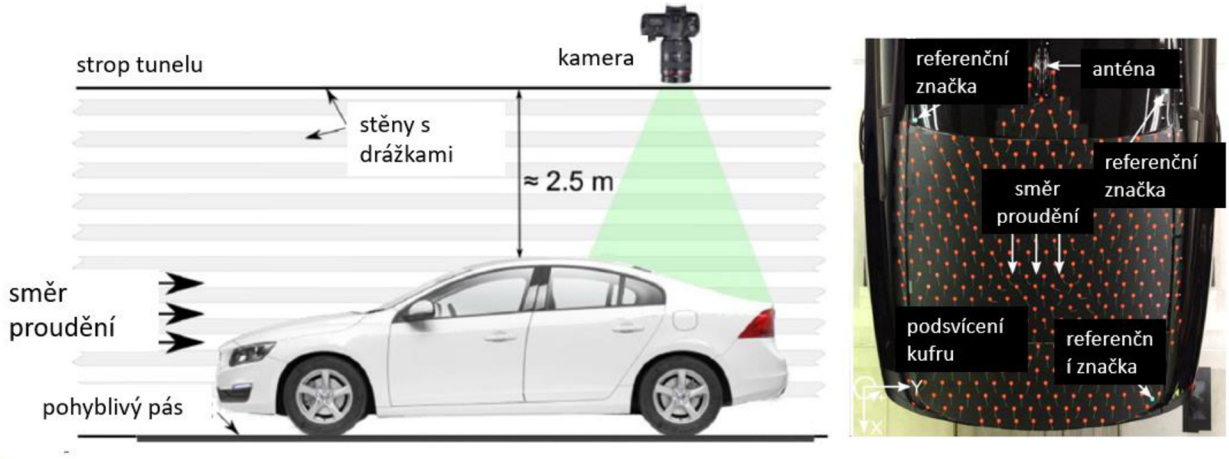
Tento odborný text pojednává o omezeních tradičních metod vizualizace proudění při pokročilých aerodynamických měřeních. Metody měření sil a tlaků, ačkoliv jsou běžné a snadno proveditelné, neposkytují dostatečné informace o samotném proudění vzduchu. Pro detailnější analýzu se využívají laserové systémy PIV a LDA, které jsou však nákladné, časově náročné na instalaci a mohou být bezpečnostním rizikem. Článek dále zmiňuje tradiční metody vizualizace pomocí olejového nátěru a bavlnek. I když je aplikace bavlnek rychlejší a jednodušší, neposkytuje tak detailní data jako olejový nátěr a nedodává žádné kvantitativní údaje o proudění.

Na základě těchto nedostatků vědci z Technické Univerzity v Berlíně vyvinuli novou metodu využívající bavlnky v kombinaci s pokročilým zpracováním obrazu. Tato metoda umožňuje sledovat jednotlivé bavlnky v sérii fotografií a získávat tak kvantitativní data o jejich úhlech a rozložení. Získaná data následně slouží ke konstrukci proudových linií.

Hlavní výhodou této metody je její jednoduchost. Kromě samotných bavlnek je potřeba pouze kamera (v některých případech i blesk pro krátké expoziční časy). Na rozdíl od metody s olejovým nátěrem nedochází ke kontaminaci testovacího zařízení a změny konfigurace měření jsou díky rychlé aplikaci chomáčků mnohem rychlejší.[27]

2.1.1 NASTAVENÍ EXPERIMENTU

Měření probíhalo v uzavřeném aerodynamickém tunelu viz *obr. 14* . Tunel byl vybaven pohyblivým pásem a odsáváním mezní vrstvy. Rozměry testovací sekce jsou 15,8 m na délku, 6,6 m na šířku a 4,1 m na výšku. Rychlost proudění vzduchu byla nastavena na 100 km/h a vůz byl v klidovém stavu. Byl zkoumán vůz Volvo S60 druhé generace.



Obr. 14 Nastavení experimentu [27]

Na vůz bylo umístěno celkem 391 bavlnek o délce 35 mm a průměru 1 mm, přichycených pomocí červených samolepek o průměru 15 mm. Bavlnky byly umístěny na předpřipravenou černou fólii, která se následně nalepila na celý vůz. Pro záznam pohybu chomáčků byla použita zrcadlová kamera s 21 megapixelovým snímačem umístěná u stropu větrného tunelu. Kamera byla aerodynamicky kryta pro snížení vibrací. Pořizováno bylo celkem 1200 snímků s expozičním časem 1/1000 sekundy a frekvencí přibližně 1 snímek za sekundu.[27]

2.1.2 ZPRACOVÁNÍ DAT

Zpracování obrazu s bavlnkami umožňuje extrahovat úhly bavlnek v jednotlivých snímcích pořízených během experimentu. Na základě těchto dat lze následně určit trajektorie bavlnek na povrchu a vytvořit statistické údaje o proudění vzduchu. Celý proces zpracování obrazu se skládá ze tří modulů: předzpracování, sledování bavlnek a následné zpracování.

Předzpracování: Upravuje se kontrast obrazu pro lepší detekci bavlnek. Dále se pomocí tří referenčních značek korigují drobné posuny obrazu způsobené pohyby vozu v tunelu a vibracemi kamery.

Sledování bavlnek: Algoritmus analyzuje každou bavlnku v jednotlivém snímku. Nejprve se detekují červené nálepky, ke kterým jsou chomáčky připevněny. Následně se krok za krokem sleduje dráha každé bavlnky od nálepky ke špičce a určí se její orientace v proudění.

Následné zpracování: Existují dvě metody, jak z takto získaných dat sestavit obraz proudění vzduchu kolem vozu viz *obr. 41*. Výsledný směr proudění jak pak průměrná hodnota všech poloh bavlnky. [27]

2.1.3 VÝSLEDKY A ZÁVĚR

Analýza pohybu bavlnek poskytuje více informací než pouze průměrný snímek . Každá bavlnka nese kvantitativní data o proudění vzduchu v podobě statistických údajů o směru jeho rychlosti. Dále práce ukazuje jasnou korelaci mezi velikostí směrodatné odchylky a vysoké pravděpodobnosti výskytu turbulence v daném místě. Následně bylo v práci provedeno porovnání s vizualizací pomocí olejového filmu a CFD výpočty kde panovala velmi dobrá shoda.[27]

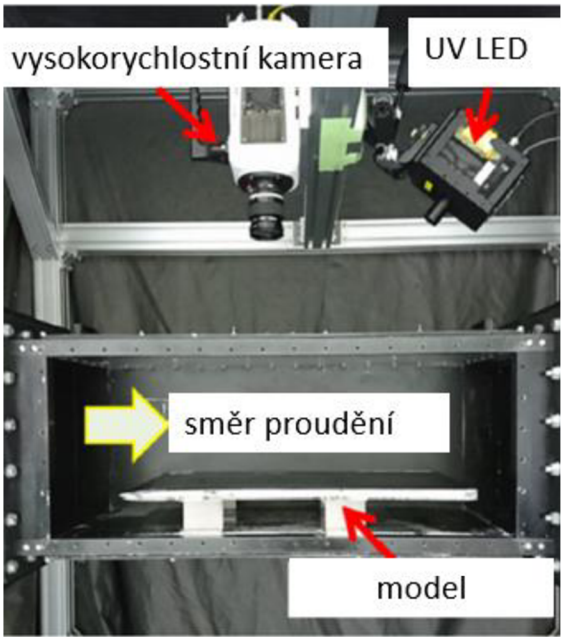
2.2 DIGITALIZATION AND QUANTITATIVE FLOW VISUALIZATION OF SURROUNDING FLOW OVER A SPECIALLY-SHAPED COLUMN-FRAME BY LUMINESCENT MINI-TUFTS METHOD

Tato studie se zabývá kvantitativní analýzou proudění kolem modelu části krytu leteckého motoru, pomocí metody luminiscentních miniaturních bavlnek. Analýza zahrnuje digitalizaci a rozpoznávání bavlnek, výpočet jejich úhlu a posouzení jejich oscilace na základě plochy, kterou během oscilace pokryjí. Jádro práce spočívá v automatickém převodu pořízených snímků bavlnek na digitální matice, což umožňuje následnou kvantitativní analýzu.[28]

2.2.1 NASTAVENÍ EXPERIMENTU

Experiment se odehrával v malém testovacím větrném tunelu viz *obr. 15*. A jako model byla využita část krytu leteckého motoru. Bavlnky v této práci byly z materiálu podobnému hedvábí s fluoreskující úpravou o průměru 0,1mm. Záznam byl pořizován na vysokorychlostní

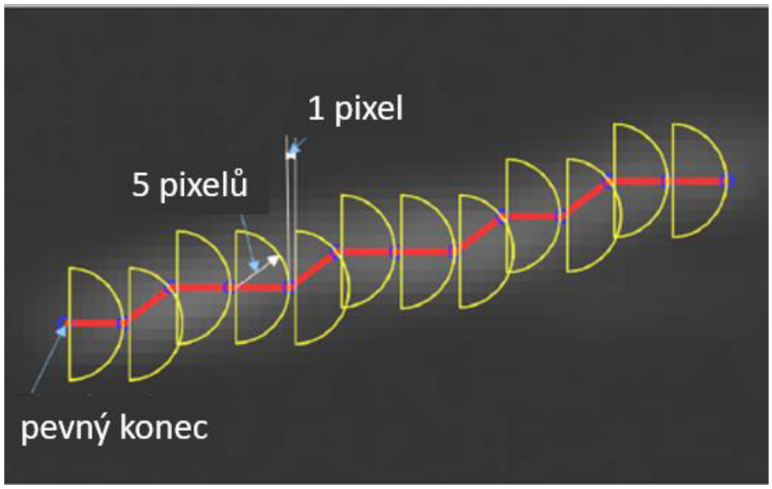
kameru. Stav byl dále opatřen LED zdrojem ultrafialového záření. K docílení co nejvyššího kontrastu s podložkou.[28]



Obr. 15 Nastavení experimentu [28]

2.2.2 ZPRACOVÁNÍ DAT

Část této práce se věnuje podrobnému popisu rozpoznávání jednotlivých bavlnek. Nejprve dochází k převodu obrazu na černobíle spektrum, kdy se jednotlivé pixely liší pouze jasem. Následně jsou vybírány pouze nejjasnější body a autoři předpokládají že bod nacházející se vlevo je bodem počátečním. Na *obr. 16* je vidět postup vyhledávání dalších jasných bodů. Vždy je vytvořen půlkruh o velikosti 5 pixelu a v něm je vyhledávám další bod. Půlkruh z důvodu, aby nebyl omylem vyhledám bod předešlý a nedošlo k duplicitě. Jako výsledný směr proudění je určen spojnicí počátku a konce bavlnky.



Obr. 16 Princip rozpoznání bavlnky [28]

3 MĚŘÍCÍ STAV

Měření bude probíhat na zkušebním stavu pro měření průtokových charakteristik ventilátorů a chladičů. Stav je rozšířen o vlastní konstrukci, která umožní traverzování s bavlnkami skrz celý prostor ventilátoru. Stav se skládá z několika částí.

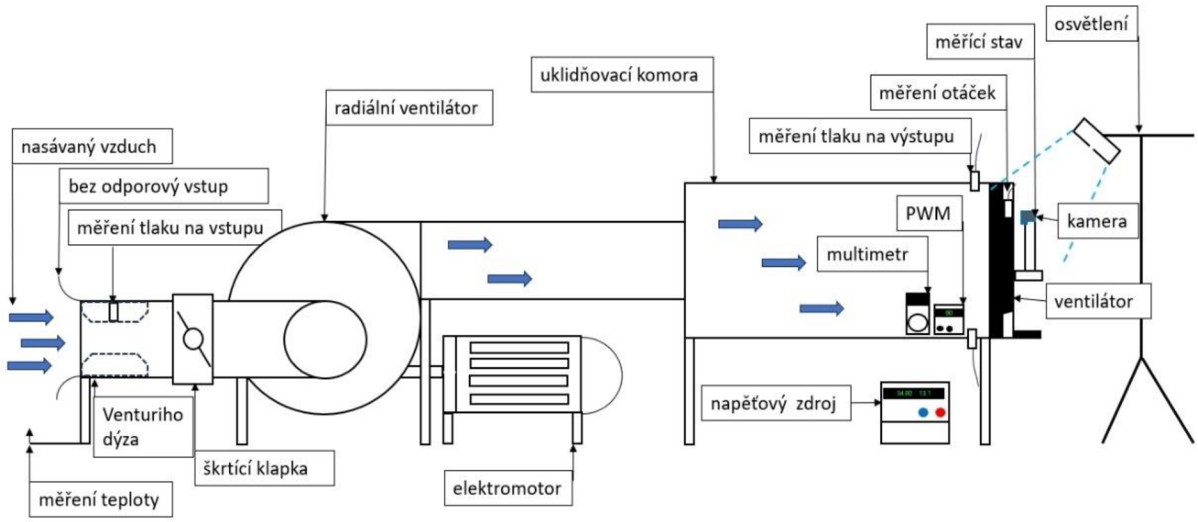
3.1 STAV PRO MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK VENTILÁTORŮ

Stav se skládá z bez odporového sání, škrtící klapky pro regulaci průtoku a zdroj vzduchu zabezpečuje radiální ventilátor. Následuje vedení a prostor pro usměrnění a uklidnění vzduchu před samotným ventilátorem viz schéma na obr. 17.

Stav je vybaven senzorikou pro měření všech potřebných dat a veličin pro kompletní popis okolí při daných testech. O zaznamenávání dat se stará ústředna zkušebny a výsledky zpracovává vlastní software společnosti Fluidea.

Ventilátor je napájen laboratorním zdrojem napětí, otáčky jsou řízeny pomocí pulzně šířková modulace (PWM) (*obr. 18*), skutečné napětí na ventilátoru je měřeno pomocí svorek multimetrem. Otáčky jsou měřeny optickým snímačem. Teplota je měřena na začátku vstupu pomocí NTC čidla.

Průtok je následně dopočítáván, a to z rozdílů tlaku na vstupu ve Venturiho dýze a před výstupem k ventilátoru.



Obr. 17 Schéma kalibrační trati se stavem pro měření bavlnek

3.2 VENTILÁTOR

Chladicí ventilátor slouží k nucenému chlazení motoru automobilu v situacích, kdy přirozené proudění vzduchu nepostačuje k odvodu přebytečného tepla. Jedná se o klíčovou komponentu chladicího systému, která zajišťuje optimální provozní teplotu motoru a zabraňuje jeho přehřátí.

Funkce:

- **Nucené chlazení:** Ventilátor nasává okolní vzduch a vhání ho přes chladič motoru, čímž dochází k odvodu tepla z chladicí kapaliny.
- **Podpora v náročných podmínkách:** Ventilátor je nezbytný v nízkých rychlostech, při vysokém zatížení motoru a v horkém počasí, kdy přirozený proudění vzduchu nestačí.
- **Podpora klimatizace:** Ventilátor chlazení napomáhá i funkci klimatizace tím, že zajišťuje dostatečný průtok vzduchu přes kondenzátor klimatizace.
- **Podpora chlazení brzd:** Vzduch hnaný ventilátorem se také využívá k chlazení brzd. Primárně při pomalé jízdě a vysokém brzdném výkonu. Vzduch je typicky veden motorovým prostorem a pomocí mřížek v podběžích usměrňován na brzdiče.

Konstrukční provedení:

- **Jeden ventilátor:** Ventilátor je vybaven pouze jednou vrtulí a elektromotorem.
- **Dva ventilátory:** Pro maximální využití plochy chladiče a optimální chlazení jsou některá ventilátory vybaveny dvěma vrtulemi, které se liší průměrem.

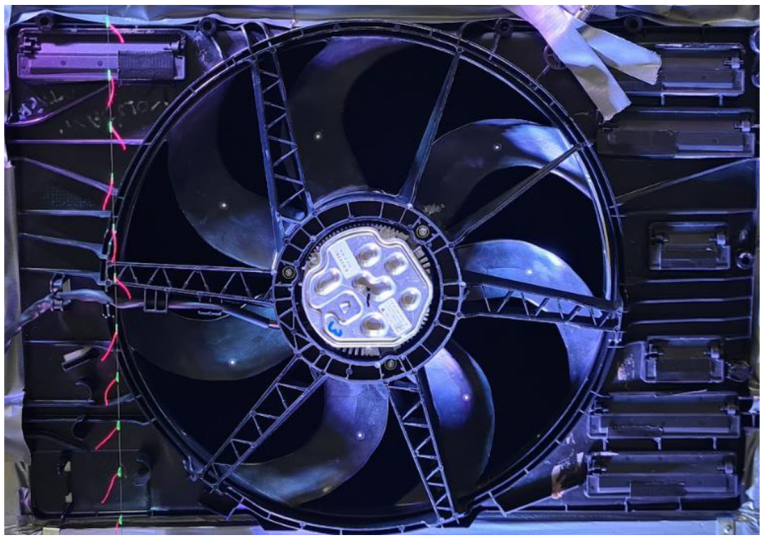
Řízení otáček:

Otáčky ventilátoru se řídí v závislosti na teplotě motoru a dalších faktorech, jako je rychlost jízdy a zatížení motoru. Většina ventilátorů je řízena termostatem, který spíná ventilátor v případě, že teplota motoru překročí nastavenou mez. Při měření bude řízení otáček prováděno pomocí pulzně šířková modulace (PWM) regulátoru viz *obr. 18*.

Obr. 18 PWM regulátor

Pro měření bude využít ventilátor (obr. 19). Jedná se o sériový ventilátor používaný v osobních vozech. Ventilátor je dále vybaven otvíracími klapkami, ty slouží pro snížení odporu při výších

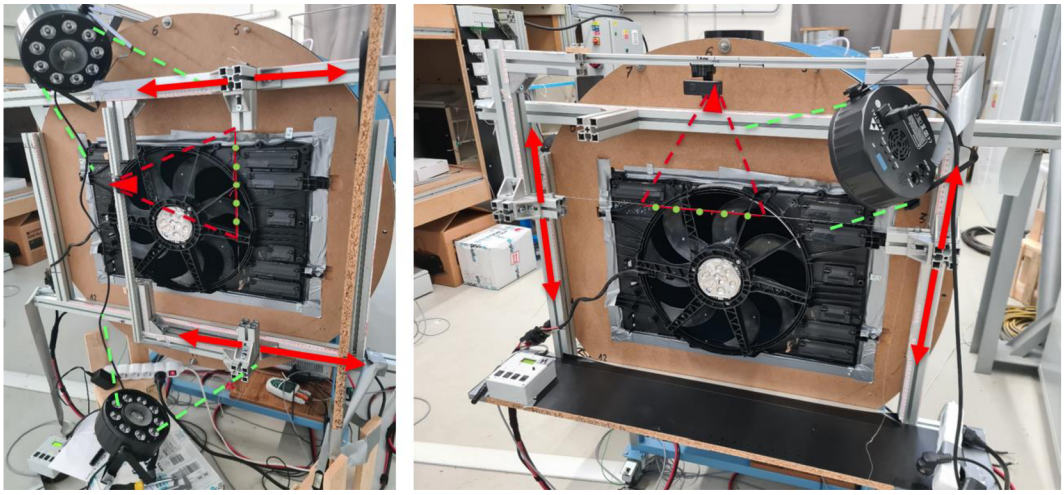
rychlostech a zvýšení průtočné plochy ventilátoru. Během testu budou zavřeny, aby nedoházelo k negativním změnám v průtoku.



Obr. 19 Ventilátor

3.3 STAV PRO MĚŘENÍ BAVLNEK

Aby bylo možné získat kompletní informace o proudění a pohybu bavlnek ve 3D je nutné snímat bavlnky ve dvou na sebe kolmých rovinách. Dále aby bylo možné jednotlivé bavlnky od sebe odlišit a nedocházelo k překrytí jednotlivých vláken je nutné, aby se traverzovalo, tedy postupně se prošla celá zájmová oblast vždy s jednou vrstvou bavlnek. K tomu slouží, právě navržený přípravek. Jeho cílem je umožnit pohyb právě ve dvou osách, a to ve směru vertikálním a horizontálním. Dále přípravek funguje jako stativ pro kameru, kterou udržuje v konstantní pozici od měřených bavlnek. Aby nedocházelo k rozdílu v měření díky změně vzdálenosti kamery od zájmového objektu.



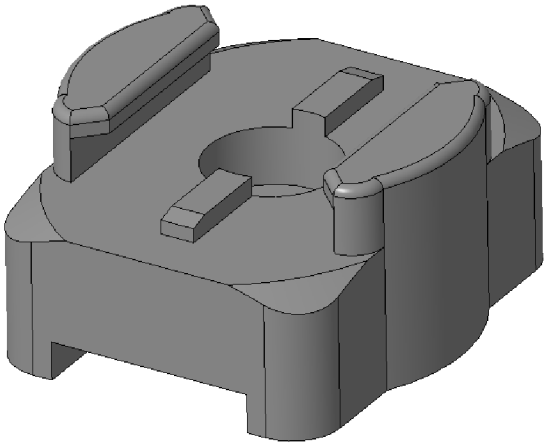
Obr. 20 Měřící stav – vlevo varianta pro vertikální měření, vpravo pro horizontální

Světla jsou umístěna na externích stojanech, ideální stav by byl umístit je na nosnou část kamery. Aby bylo pokaždé zajištěno konstantní osvětlení a opadla by nutnost přenastavení při každé změně polohy. Ovšem svou hmotností negativně ovlivňovaly vibrace systému a vnášely chybu do měření. Červené šipky na *obr. 20* znázorňují směr pohybu systému. Čerchované

červené čáry znázorňují zorné pole kamery a čerchované zelené čáry značí směr osvětlení. Zelenými tečkami jsou následně vyznačeny měřené bavlnky. Aby bylo zajištěně kontrastní pozadí vůči měřeným objektům jsou zvoleny červené bavlnky a světle zelené body pro uchycení. Uchycení bavlnek je pomocí barevných kruhových etiket o průměru 8 mm. Stav je vybaven černou deskou, sloužící jako pozadí.

Samotný stav je primárně zkonstruovaný z hliníkových profilů o rozměrech 45x45 mm, aby byla zajištěna modulárnost a možnost rychlé kompletace a robustnost systému pro zajištění opakovatelnosti měření.

Pro uchycení kamery byl zkonstruován přechodný člen viz *obr. 21*, mezi hliníkovým profilem s rozměry 20x20 mm a komerčně dostupným držákem GoPro kamery. Vyroben byl pomocí 3D tisku z materiálu PETG.



Obr. 21 Uchycení kamery na hliníkový profil

3.4 KAMERA

Jako kamera pro zaznamenávání obrazu byla zvolena akční kamera GoPro HERO 12 (obr. 22). Ve společnosti Fluidea se využívá také k dalším experimentům a pro potřeby práce byla plně dostačující. Výhodou je možnost ovládat kameru dálkově pomocí aplikace, a její kompaktní

Obr. 22 GoPro Hero 12

rozměry, které by neměly ovlivnit proudění, pokud se kamera dostane do zájmové oblasti měření.

Zde jsou technické specifikace kamery:

Tab. 1 Specifikace kamery [29][30]

Snímač	Typ 1/1.9 (6.3 x 5.5mm) CMOS sensor
Bitová hloubka	10 bitů
Rozlišení snímače	27MP
Ohnisková vzdálenost ekvivalentní 35 mm	12 – 39 mm
Maximální clona	f/2.5
Video formát a snímkovací frekvence	5.3K (16:9) 30p, 4K (8:7) 30p, 4K (16:9) 60p
Poměr stran	16:9, 4:3, 8:7, 9:16
Zorné pole horizontální při 16:9	87°
Zorné pole vertikální při 16:9	56°
Rychlost závěrky	1/8 až 30 sekund v režimu fotografie 1/480 až 1/30 sekundy v režimu videa
Rozsah citlivosti ISO	Fotografie 100 až 3200 Video 100 až 6400

3.5 OSVĚTLENÍ

Osvětlení je zajištěno pomoci dvou LED reflektorů s možností volby barvy v celém rozmezí barevného spektra RGB (red, green, blue). Jak je zmíněno v části věnující se měřícímu stavu světla jsou umístěna na externích stojanech, aby neovlivňovala svojí hmotností míru vibrací systému způsobených rotací ventilátoru a dále také pro jednoduchou manipulovatelnost při změnách snímané polohy bavlnek.

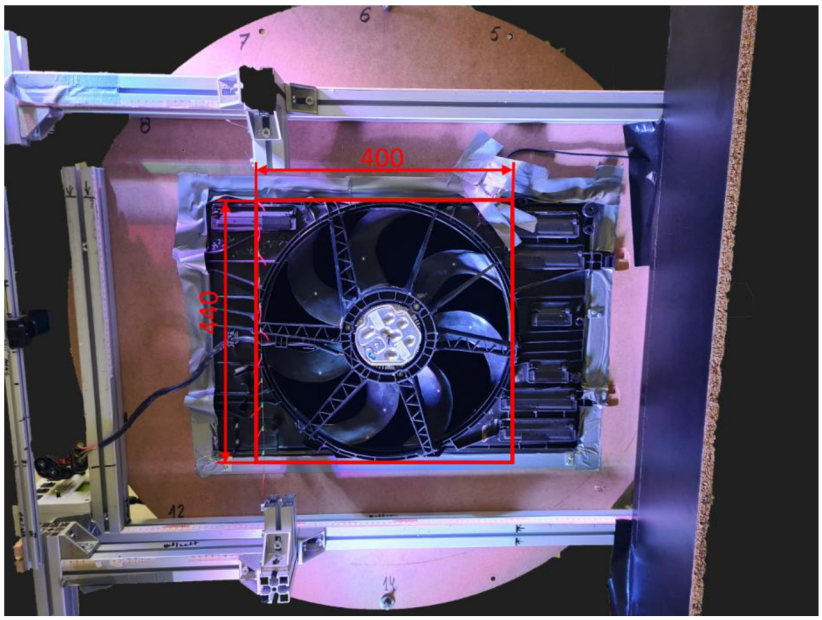
Obr. 23 LED RGB reflektor

3.6 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Pro účely diplomové práce a ověření metodiky experimentu bude provedeno měření při zadaných okrajových podmínkách. Ve zvolené zájmové oblasti viz *obr. 25*.

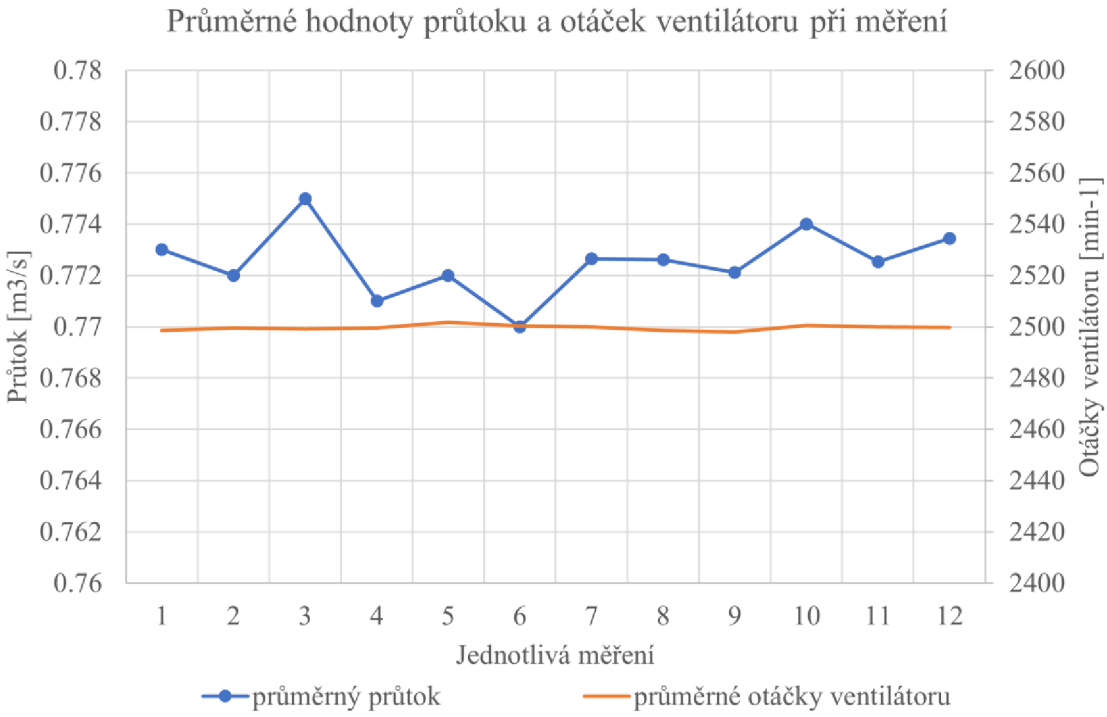
Tab. 2 Okrajové podmínky experimentu

Měřená rovina od desky	[mm]	101
Průtok	[m^3/s]	0,775
Napětí(zdroj)	[V]	13
PWM	[%]	90
Hustota sítě bavlnek	[mm]	20x20
Měřená plocha	[mm]	440x400
Počet bavlnek celkem	[-]	483
Délka bavlnek	[mm]	35



Obr. 25 Zájmová oblast

Během měření byly monitorovány všechny zmíněné veličiny. Záznamy měření jsou zpracovány pomocí softwaru zkušebny. V grafu na obr. 24 jsou průměrné hodnoty průtoku a otáček ventilátoru během experimentu. Měření probíhalo ve 4 blocích. Záznam byl pořizován vždy v počáteční, střední a konečné fázi měření. Po zbytek času byl monitorován bez záznamu. Z důvodu časové náročnosti měření.



Obr. 24 Průměrné hodnoty během experimentu

4 VYHODNOCOVÁNÍ DAT

Pomocí programovacího jazyku Python byl vytvořen vyhodnocovací program, který na základě rozlišovaní barev rozpoznává a zaznamenává polohu bavlnek v čase.

4.1 OBRAZOVÁ ANALÝZA

Analýza obrazu je proces extrakce smysluplných informací z obrázků, ať už statických nebo dynamických. V praxi se jedná o rozbor dat obsažených v obrazech, které mohou být ve formě pixelů, geometrických tvarů, textury, barvy nebo jiných vizuálních vlastností.

Lidský druh využívá analýzu obrazu od nepaměti, a to pro rozpoznávání jídla, nebezpečí, a dalších důležitých informací pro přežití. Lidské vidění je rychlé, flexibilní a dokáže se zaměřit na relevantní objekty a filtrovat rušivé elementy. Kombinace oka a lidského mozku je inspirací pro vývoj obrazové analýzy, strojového vidění a učení.

V některých úkolech je lidský zrak přesnější a spolehlivější než strojové vidění, které se může potýkat s rušivými elementy a vyžadovat složitější a nákladnější programy. Strojové vidění má však také své výhody: je odolné proti optickým klamům, dokáže identifikovat velké množství objektů v krátké době a je konzistentní a neúnavné.

V průmyslu se strojové vidění zavádí pro zvýšení efektivity a konzistentnosti kontroly. Systémy strojového vidění nahrazují lidské kontrolní pracovníky a zajišťují bezchybnou a nepřetržitou kontrolu produktů. Po pořízení systému nejsou nutné další náklady kromě energie

Cílem analýzy obrazu je extrahovat z obrazu smysluplné informace, které lze dále využít v různých oblastech, jako je průmyslová kontrola, lékařská diagnostika, strojové vidění a další.[31][32]

Základní principy:

Digitální obraz je reprezentován dvourozměrnou maticí pixelů, kde každý pixel má definovanou barvu a jas. Počet pixelů v matici udává rozlišení obrazu. Pro analýzu obrazu je důležitá kvalita obrazu, která závisí na použitém snímacím prvku, osvětlení a kontrastu scény.

Před samotnou analýzou obrazu je často nutné provést některé transformace, jako je konverze na monochromatický nebo binární obraz, odšumění, vyrovnání kontrastu a geometrické transformace. Tyto transformace slouží k přípravě obrazu pro další zpracování a k usnadnění získání požadovaných informací.[31][32]

Metody analýzy obrazu:

Existuje mnoho metod analýzy obrazu, které se liší v závislosti na typu úkolu a typu obrazu. Mezi základní metody patří:

- **Segmentace obrazu:** Cílem segmentace obrazu je rozdělit obraz na jednotlivé objekty nebo oblasti zájmu.
- **Detekce objektů:** Cílem detekce objektů je najít a lokalizovat objekty v obraze.

- **Rozpoznávání objektů:** Cílem rozpoznávání objektů je identifikovat typ objektu v obraze.
- **Měření vlastností objektů:** Cílem měření vlastností objektů je kvantifikovat vlastnosti objektů v obraze, jako je jejich velikost, tvar, poloha a orientace.

Aplikace analýzy obrazu

Analýza obrazu se používá v široké škále aplikací, včetně:

- **Průmyslová kontrola:** Analýza obrazu se používá pro kontrolu kvality produktů ve výrobních procesech.
- **Lékařská diagnostika:** Analýza obrazu se používá pro diagnostiku nemocí z lékařských snímků, jako jsou rentgenové snímky a magnetická rezonance.
- **Strojové vidění:** Analýza obrazu se používá v robotice pro navigaci a manipulaci s objekty.
- **Biometrie:** Analýza obrazu se používá pro rozpoznávání obličeje a otisků prstů.
- **Dopravní systémy:** Analýza obrazu se používá pro sledování dopravy a detekci dopravních nehod.

4.2 PYTHON

Python je univerzální programovací jazyk s širokým spektrem využití. Vyznačuje se důrazem na čitelnost kódu a snadné pochopení, s čímž souvisí i jeho popularita v oblasti strojového učení.

Python se dlouhodobě řadí mezi nejoblíbenější programovací jazyky a získal si značnou popularitu v komunitě strojového učení. Důvody pro jeho vzrůstající popularitu zahrnují: [33]

- **Všestrannost:** Python je univerzálně použitelný jazyk, který lze s úspěchem aplikovat v široké škále oblastí, jako je umělá inteligence, neurální sítě, hluboké učení, internet věcí a robotika.

- **Snadné použití:** Syntaxe Pythonu je intuitivní a snadno se učí, čímž je přístupný i začínajícím programátorům.

- **Rychlý vývoj prototypů:** Díky rychlému procesu psaní kódu a jeho kratší délce ve srovnání s jinými jazyky je Python ideální pro tvorbu prototypů.

- **Bohatý ekosystém:** Python disponuje rozsáhlou komunitou a širokou škálou knihoven a nástrojů, které usnadňují vývoj a implementaci programů.

- **Dynamická typová kontrola:** Typy proměnných se automaticky určují při běhu programu, čímž se eliminuje nutnost explicitního deklarace typů.

- **Bohatá standardní knihovna:** Python disponuje rozsáhlou standardní knihovnou, která obsahuje širokou škálu funkcí a modulů pro různé úkoly a dále existuje mnoho dalších knihoven specializovaných na různou problematiku jako je NumPy, SciPy, scikit-learn.

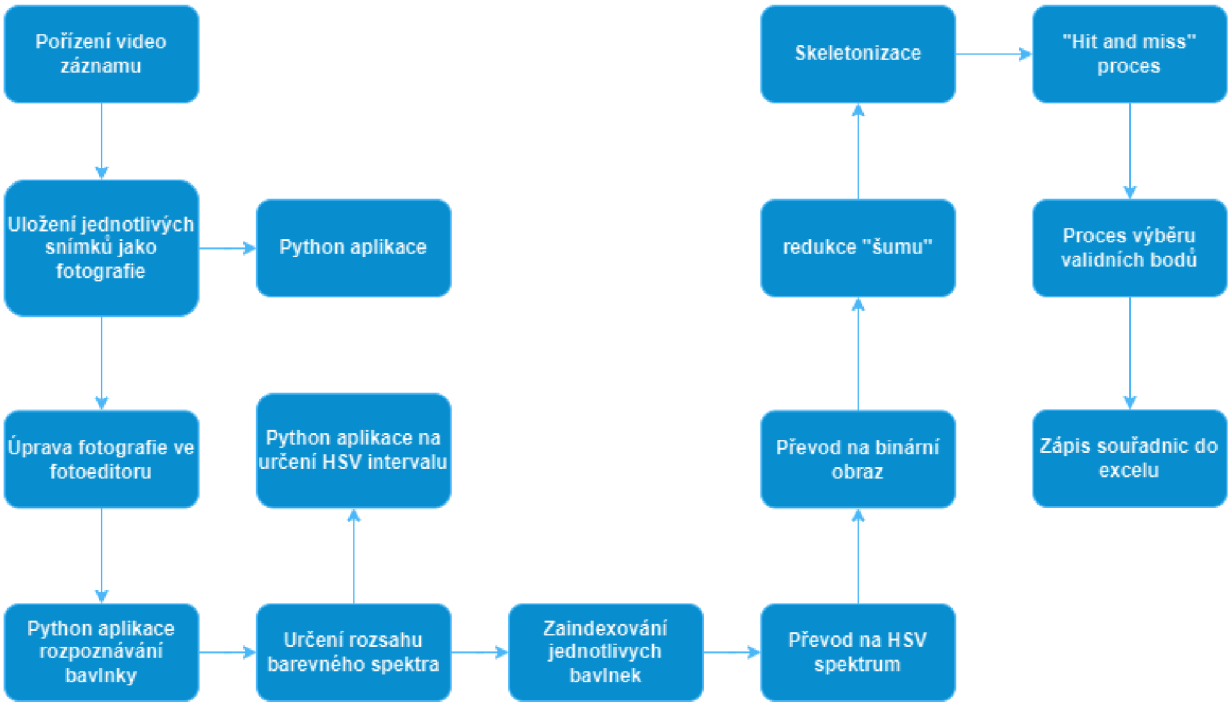
4.3 KNIHOVNY

Programovací jazyk Python disponuje rozsáhlou škálou knihoven, které rozšiřují jeho funkčnost a umožňují implementaci široké škály úkolů. V kontextu vývoje programu pro rozpoznávání předmětů jsou jako příklad uvedeny následující knihovny:

- **OpenCV:** Tato knihovna je zaměřena na práci s obrázky a videem. Nabízí širokou škálu funkcí pro zpracování obrazu, jako je detekce hran, filtrace, transformace a rozpoznávání objektů. V rámci projektu sloužila knihovna OpenCV k načtení a zpracování snímků z kamery.[34]
- **NumPy:** NumPy je knihovna pro numerické výpočty, která umožňuje efektivní práci s matematickými operacemi. V projektu byla knihovna NumPy využita pro zpracování numerických dat a provádění matematických výpočtů. [35]

4.4 VLASTNÍ PROCES

Na diagramu viz *obr. 26* je patrný proces zaznamenávání obrazu, příprava na vyhodnocení, rozpoznávání bavlnek na základě barevného spektra až po ukládání dat pro následnou vizualizaci a zpracování.



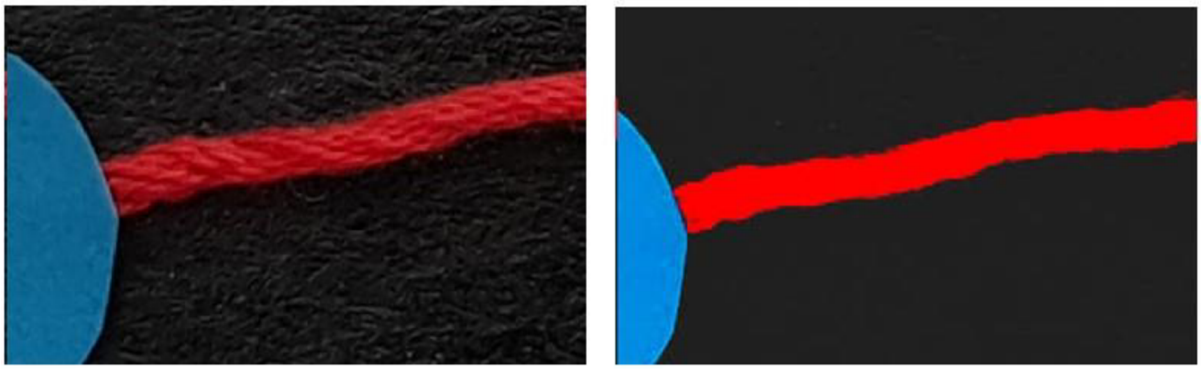
Obr. 26 Vyhodnocovací proces

4.4.1 POŘÍZENÍ VIDEO ZÁZNAMU

Za účelem snížení časové náročnosti měření bylo pořizováno video o frekvenci 30 snímků/s s rozlišením 4K tedy 4096 × 2160 pixelů. Kamera je schopna pořizovat fotografie pouze s frekvenci 2 snímky/s. A při potřebném objemu snímků by bylo fotografování časově mnohem náročnější. Čas závěrky je nastaven na 1/960 s. Je to čas, kdy jsou bavlnky zaznamenány ostře. ISO je nastaveno v rozmezí 100 až 800 k zachování kvality snímku a zamezení tzv. zrnění.

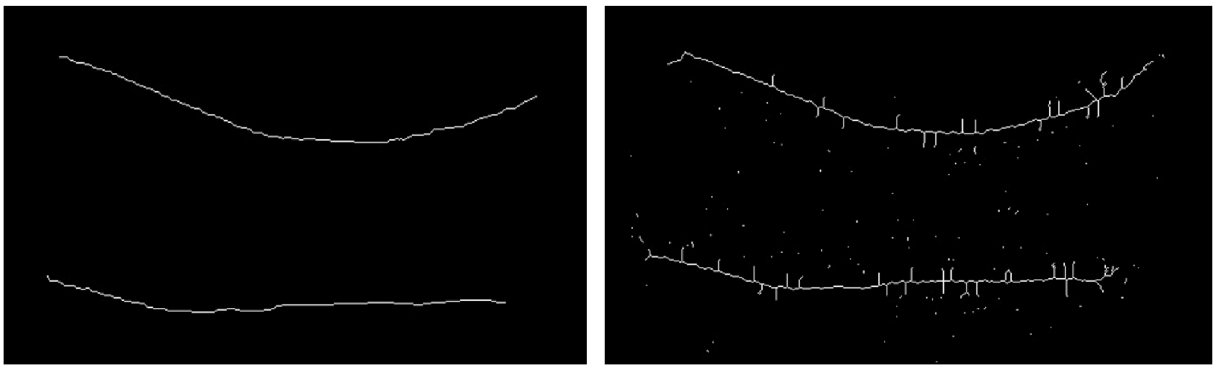
4.4.2 ÚPRAVA JEDNOTLIVÝCH SNÍMKŮ

Pro získání co možná nejlepší informace z pořízených fotografií je nutné snímky graficky upravit. Předchází se tím vzniku rušivých elementů a fragmentů. Snímky jsou vyhodnocovány na základě jednotlivých pixelu a jak je patrné na *obr. 27* na detailů bavlnky. Vznikají zde např. odlesky a některé pixely mohou být až bílé a nezapadají do daného barevného intervalu. To narušuje pospolitost skeletonu a mohl by být například chybně vyhodnocen konec bavlnky.



Obr. 27 Vlevo původní snímek, vpravo po úpravě

V programu jsou použity funkce, které se tyto jevy snaží eliminovat. Detailněji budou rozebrány v dalších krocích. Jak ale může vypadat chybné rozpoznání bavlnek je vidět na *obr. 28*.

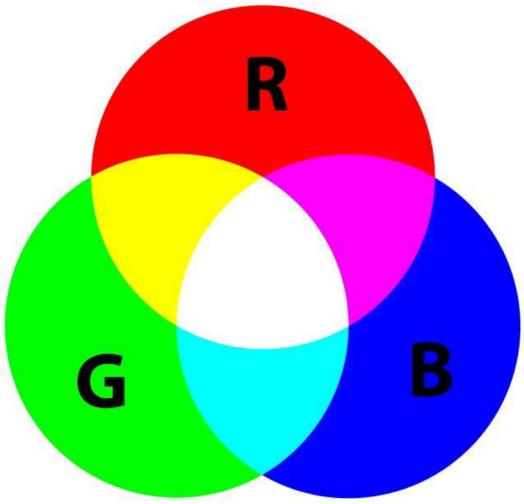


Obr. 28 Čistý skeleton vlevo, skeleton s fragmenty a šumem vpravo

Grafická úprava spočívá zaprvé v ořezu obrazu na zájmovou oblast ke snížení výpočetního času a případně pootočení obrazu, aby odpovídaly souřadnému systému. Dále probíhá zvýšení kontrastu, saturace. Zvýraznění zelené a červené barvy. Popřípadě redukce přesvícených části obrazu a mírné rozmazání.

4.4.3 BAREVNÉ MODELY

Model RGB viz *obr. 29* je barevný model, běžně používaný v oblasti digitálního obrazu a počítačové grafiky. Tento model umožňuje reprezentovat libovolnou barvu v definovaném barevném prostoru pomocí trojice hodnot, z nichž každá udává intenzitu jedné ze základních barev: červené, zelené a modré. [36]

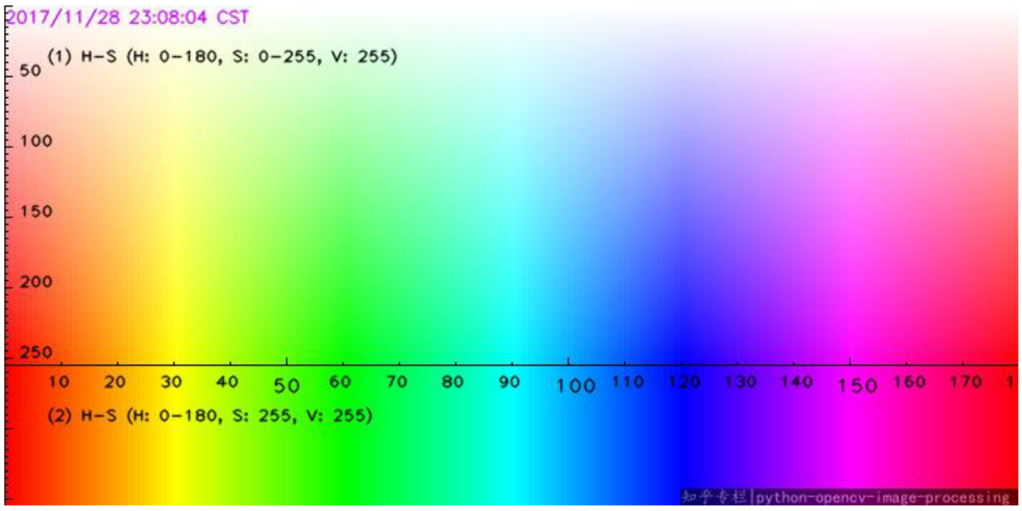


Obr. 29 RGB spektrum [37]

Barevná hloubka udává počet bitů, které jsou použity k reprezentaci barvy v digitálním obrazu. V případě 24bitové barevné hloubky má každý barevný kanál (R, G, B) k dispozici 8 bitů, čímž umožňuje rozlišovat 256 úrovní intenzity pro každou barvu (celkem 2^24 = 16 777 216 barev). [36]

Knihovna OpenCV používá mírně odlišný barevný model - BGR (Blue, Green, Red). Toto uspořádání barev je historickým dědictvím knihovny a nemění princip fungování barevného modelu.[34]

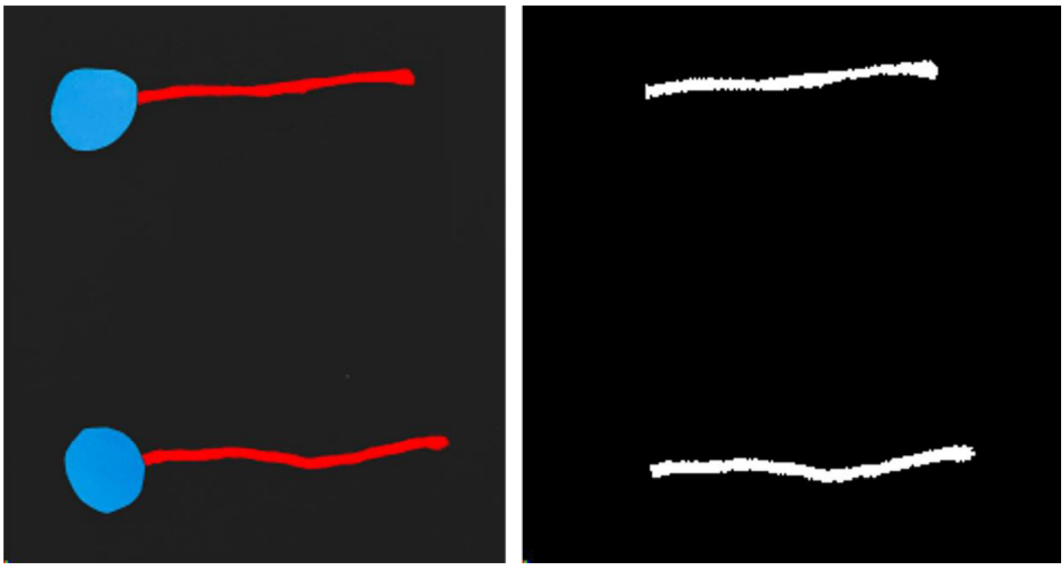
Pro detekci červené barvy v digitálním obrazu se běžně používá barevný model HSV (*obr. 30*) (Hue, Saturation, Value). Model HSV umožňuje pracovat s barvami na základě odstínu (Hue), sytosti (Saturation) a jasu (Value). Převod z RGB do HSV lze provést pomocí funkce cvtColor v knihovně OpenCV. [37]



Obr. 30 HSV spektrum [37]

K určení odstínu červené barvy byl vytvořen jednoduchý program, který po kliknutí do obrázku vypíše HSV barevný kód pro přesné určení intervalu. Barevné spektrum se částečně mění pro různé zkoušené materiály, také závisí na osvětlení a grafické úpravě. Pro účely měření byl určena spodní hranice na [150,100,100] a horní na [180,255,255].

Po detekci bavlnky na základě barvy se vytvoří maska, kdy se oblasti spadající do barevného spektra přemění na bílou a zbytek na černou. Tedy na binární oblast, kde má každý pixel hodnotu buď 255 tedy je bílý nebo 0 a je černý. Příklad je na *obr. 31*.



Obr. 31 Převod na binární obraz

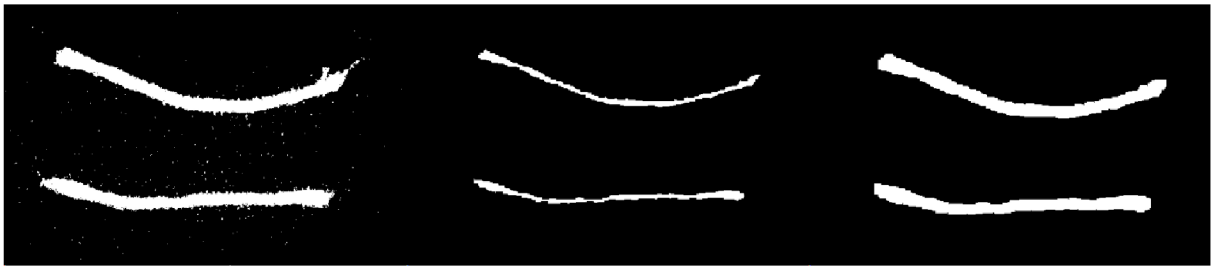
4.4.4 REDUKCE ŠUMU A FRAGMENTŮ

Morfologické operace slouží k zpracování obrazu na základě tvarů. Při těchto operacích se na vstupní obraz aplikuje strukturní prvek, tedy malá matice, která definuje tvar, který manipuluje s obrazy, a generuje se výstupní obraz. Existují dva základní typy a eroze a dilatace.

Dilatace zvětšuje objekty v binárním obrázku. Pro každý pixel v obrázku se porovná strukturní prvek s okolím pixelu. Pokud je v strukturním prvku alespoň jeden černý pixel, výstupní pixel je černý. Jinak je bílý. Jinými slovy, dilatace "rozmazává" objekty a vyplňuje díry v nich.

Eroze zmenšuje objekty v binárním obrázku. Funguje podobně jako dilatace, ale s opačným výsledkem. Pro každý pixel v obrázku se porovná strukturní prvek s okolím pixelu. Pokud je v strukturním prvku alespoň jeden bílý pixel, výstupní pixel je bílý. Jinak je černý. Eroze tak "zostřuje" objekty a odstraňuje tenké výběžky.

Kombinace eroze a dilatace se v praxi běžně k odstranění šumů**:** Eroze s malým strukturním prvkem dokáže odstranit drobné bílé fragmenty z obrazu, zatímco následná dilatace s identickým strukturním prvkem zabrání zmenšení objektů viz *obr. 32*.[38][39]



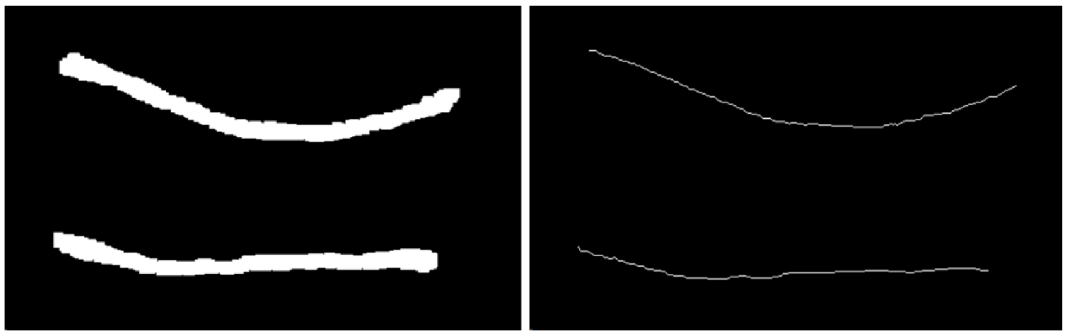
Obr. 32 zleva: maska se šumem, vliv eroze, vliv dilatace

4.4.5 SKELETONIZACE

Skeletonizace je proces v digitálním zpracování obrazu, jehož cílem je získat kostru dvourozměrného tvaru. Výsledkem skeletonizace je jedno-pixelová zobrazení původního objektu, která zachycuje jeho topologii (spojitosti a větvení) a středové osy.

Existuje celá řada algoritmů pro skeletonizaci, obecně se ale jedná o iterativní proces využívající morfologické operace, konkrétně erozi.

Vstupní data jsou typicky binární obraz, kde objekty jsou reprezentovány černými pixely a pozadí bílými pixely. Na binární obraz se opakovaně aplikuje eroze s vhodně zvoleným strukturním prvkem. Proces eroze se zastaví, když se dalším krokem neodstraní žádné pixely objektu, aniž by došlo k roztržení jeho souvislosti.[38] [39]



Obr. 33 Vlevo dilatace, vpravo výsledek skeletonizace

4.4.6 HIT OR MISS - TREF ČI MIŇ

V rámci matematické morfologie je hit-or-miss transformace (**HMT**) pokročilou technikou používanou k detekci specifických vzorů v binárním obrazu. Na rozdíl od základních morfologických operací, jako je eroze a dilatace, které pracují s jedním strukturním prvkem. HMT používá dva odlišné strukturní prvky, nazývané **B1** (hit -tref) a **B2** (miss - miň).

B1 definuje požadovaný vzor, který chceme v obraze nalézt. Černé pixely v B1 odpovídají pixelům, které musí být černé i v obraze, pro detekci vzoru.

B2 definuje nežádoucí pixely, které nesmí být černé v okolí detekovaného vzoru. Černé pixely v B2 odpovídají místům, kde musí být v obraze bílý pixel, abychom daný vzor považovali za správný.

Oba strukturní prvky postupně prochází celým obrazem. V každé pozici se porovnává okolí daného pixelu v obraze s vzory B1 a B2.Výstupní obraz obsahuje černý pixel pouze v těch pozicích, kde se okolí pixelu v obraze shoduje s B1 (hit) a zároveň neobsahuje žádný černý pixel odpovídající B2 (miss).[38] [39]

Výhody HMT:

Přesná detekce vzorů: HMT umožňuje přesnější detekci specifických tvarů v obraze oproti základním morfologickým operacím.

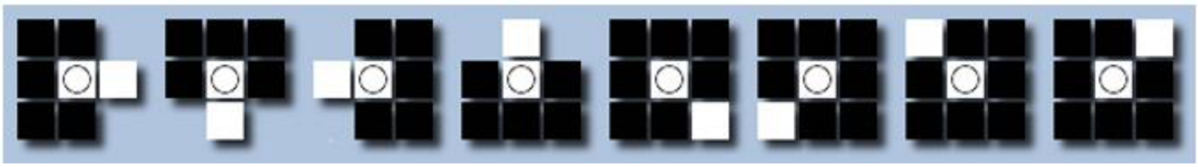
Flexibilita: Volba strukturních prvků B1 a B2 umožňuje detekci široké škály vzorů.

Nevýhody HMT:

Výpočetní náročnost: HMT může být výpočetně náročnější než základní morfologické operace, zejména u velkých obrazů.

Návrh strukturních prvků: Efektivita HMT závisí na vhodném výběru strukturních prvků, což může být pro složité vzory náročné.

Na obrázku *obr. 34* je vidět seznam vzorů, které definují konec bavlnky. Tedy v kódu byly vytvořeny matice odpovídající těmto vzorům a pomocí HTM vyhledávány. Výstupem je seznam souřadnic bodů. Ten pouze označuje že se jedná o koncový bod, nenese informaci, zda je počáteční či koncový a ke které bavlnce náleží.(*obr. 34*) [39]



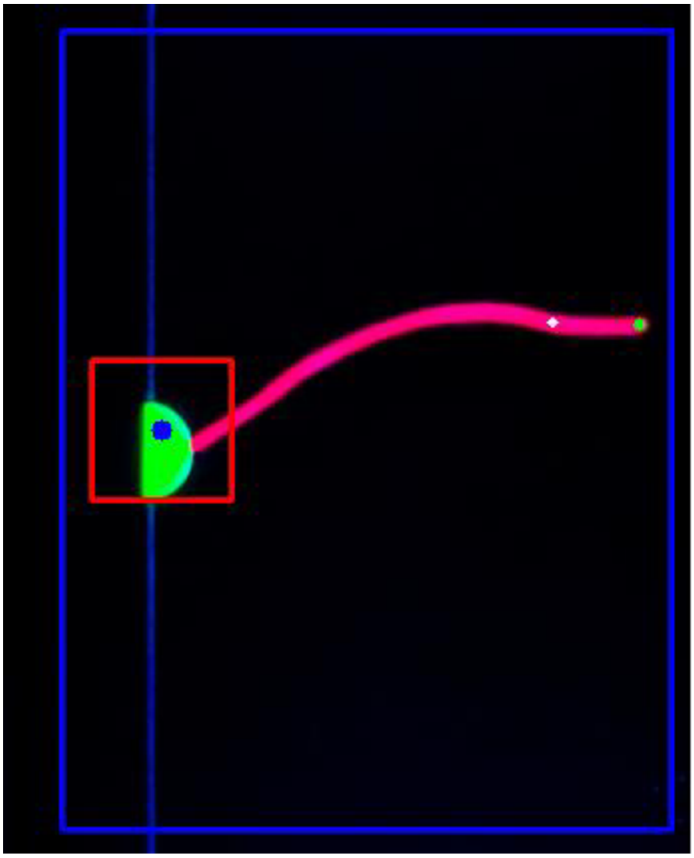
Obr. 34 Vyhledávané vzory[39]

4.4.7 VÝBĚR BODŮ

Způsobů jak správně přiřazovat vybírat a indexovat pohyb bavlnek bylo několik. Zde bude uvedeno pár z nich. První pokusy spoléhaly pouze na to, že každý lichý bod je počátek bavlnky a každý sudý je bod koncový. Taková varianta mohla být narušena s prvním špatně určeným bodem nebo šumem. Zároveň knihovna Open CV prohledává obraz od horního levého rohu po pravý spodní, není tedy zaručeno, že koncový bod bude nalezen první nebo druhý, pokud se nachází nad počátkem.

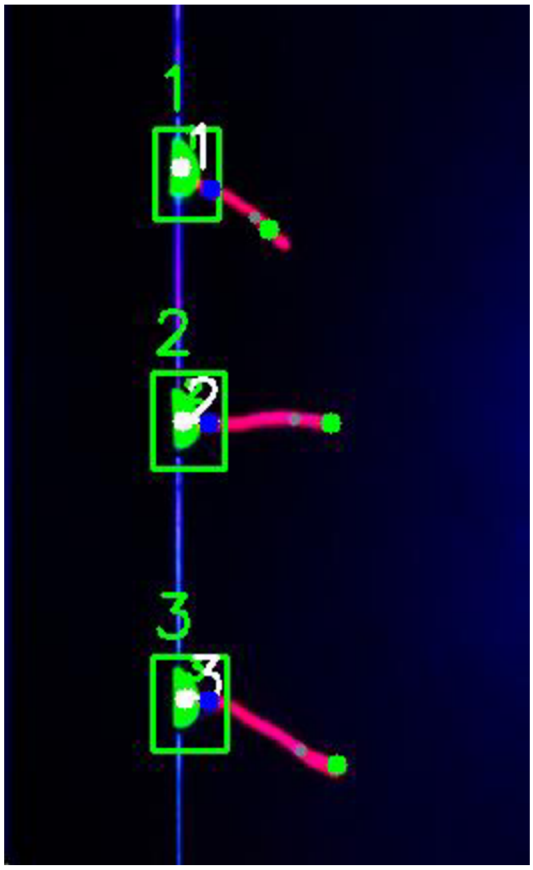
Další varianta kódu fungovala na principu zájmových oblastí. Kde v dané oblasti se mohl vyskytovat pouze počáteční bod a nikoliv koncový. Tato varianta fungovala na principu vyhledávání středu zeleného bodu jako počátku. Od něj se vytvořily zájmové oblasti. V počáteční oblasti označené na *obr. 35* červeně se mohl vyskytovat pouze počáteční bod bavlnky a v rozdílu množin, tedy mimo červenou oblast ale v oblasti modře ohraničené, se mohl vyskytovat pouze bod koncový.

Na *obr. 35* je modře označený teoretický střed zeleného půl kroužku. Zelený bod bavlnky označuje její koncový bod a bílý bod označuje bod, pomocí něhož se určuje směr poslední třetiny bavlnky. Ten je vybrán na základě dvou kružnic okolo koncového bodu. Následně jsou zapsány a zaznačeny bílé pixely, které se nachází v mezikruží. Tato metoda má ovšem nevýhodu v možnosti nižší hustoty sítě bavlnek vedle sebe. Zájmové oblasti by se mohly narušovat a docházet k jejich překrytí a tím pádem vzniku chyb indexování jednotlivých bodů.



Obr. 35 Zájmové oblasti kolem bavlnky

Finální varianta sloužící k vyhodnocování pohybu bavlnky spočívá na funkci cv2.connectedComponentsWithStats. Funkce přiřadí index každému skeletonu, jenž se nachází na obraze. A uloží seznam bodu s daným indexem. Kvůli nepřesnému určování středu zeleného půl kruhu a možné chybné indexaci při větším počtu bavlnek. Byl kód upraven tak, aby na začátku každé série fotografii byl uživatel požádán o určení počtu bavlnek a vybrání jejich středů. Tím se každému středu přiřadí i originální index. Pomocí něhož budou zapisovány data z dané bavlnky. Kolem jednotlivých středů se vytvoří oblast zájmů o velikosti zeleného obdélníku na *obr. 36*. V něm je vyhledán počáteční bod bavlnky a následně je tento bod spárován se skeletonem. Skeleton má vždy dva koncové body, přičemž jeden se nachází v zájmové oblasti a druhý nikoliv. Tak známe koncový i počáteční bod bavlnky. Další informace, kterou funkce poskytuje je počet prvků, jenž se ve skeletonu nachází. Je tedy možné vždy vypočítat přesně poslední třetinu délky. Data se ukládají pro každou bavlnku zvlášť a jsou připravená pro statistické zpracování.



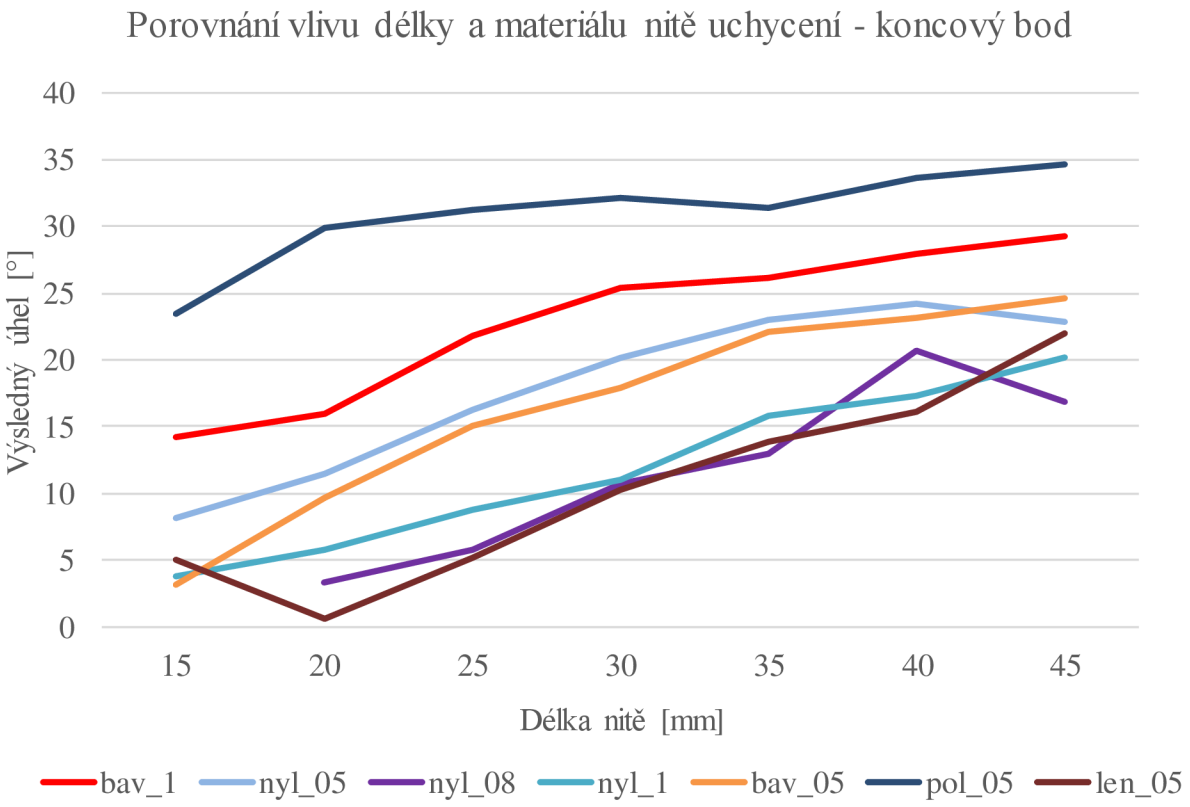
Obr. 36 Rozpoznávání bavlnek-finální varianta

5 MĚŘENÍ

Před samotným měřením bylo nutné rozhodnout několik faktorů které by mohly mít vliv na přesnost měření, ale také vliv na dobu zpracování a jeho způsob.

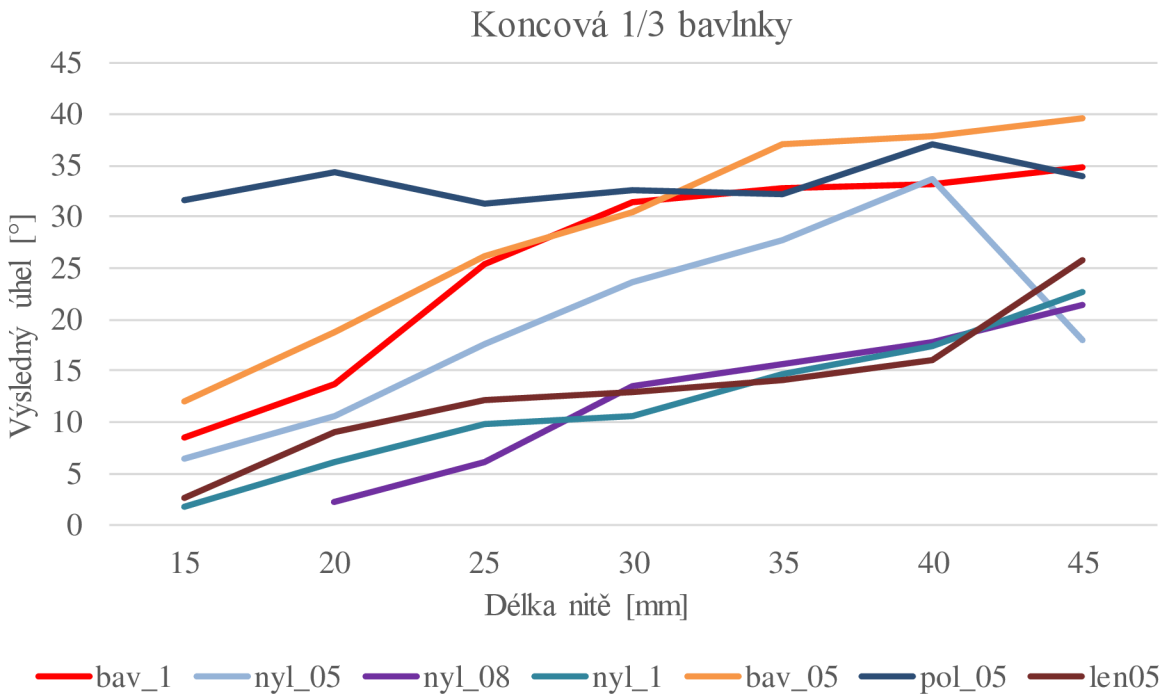
5.1 VÝBĚR MATERIÁLU A DÉLKY NITĚ

Z dostupných zdrojů je patrné, že na experiment lze využít různé materiály, jako je například nylon, polyester, bavlna, len. Kromě výběru materiálu je také nutné zvolit správnou délku bavlnky. Cílem je nají přesný balanc mezi co nejkratší délkou, aby mohla být zvolena co nejhustější síť pro co nejlepší popsání proudění, a zároveň redukovat počet měření, ovšem zachovat to, aby bavlnka nebyla ovlivněna uchycením a její pohyb co nejlépe odpovídal proudění. Proto bylo provedeno úvodní měření, které mělo za cíl vybrat materiál a délku bavlnky. Která bude na proudění nejcitlivější. Zvolené materiály jsou klasické nitě z materiálů vypsaných výše a o různých průměrech. Opět cílem bylo využít co nejtenčí bavlnku, aby co nejméně ovlivňovala okolní proudění, ale zároveň byla stále dobře rozpoznatelná na videozáznamu.



Obr. 37 Porovnání vlivu délky a materiálu nitě, uchycení – koncový bod

Jak je patrné z grafu (*obr. 37*) největší citlivost na proudění ukazují polyesterová nit o průměru 0,5 mm a o něco horší bavlněná nit o průměru 1 mm. Nylonové nitě a len se ukázaly jako nevyhovující. Je u nich ovšem patrný trend že se zvedajícím průměrem klesá citlivost, ten ovšem neplatí u bavlnek. Kdy bavlnka s větším průměrem je citlivější na proudění. To je nejspíše zapříčiněno způsobem pletení. Kdy tenčí bavlnka je spletena ze 3 základních vláken, přičemž bavlnka s větším průměrem ze 6. Výsledný směrový úhel je vyhodnocován na základě počátečního bodu a koncového bodu bavlnky.



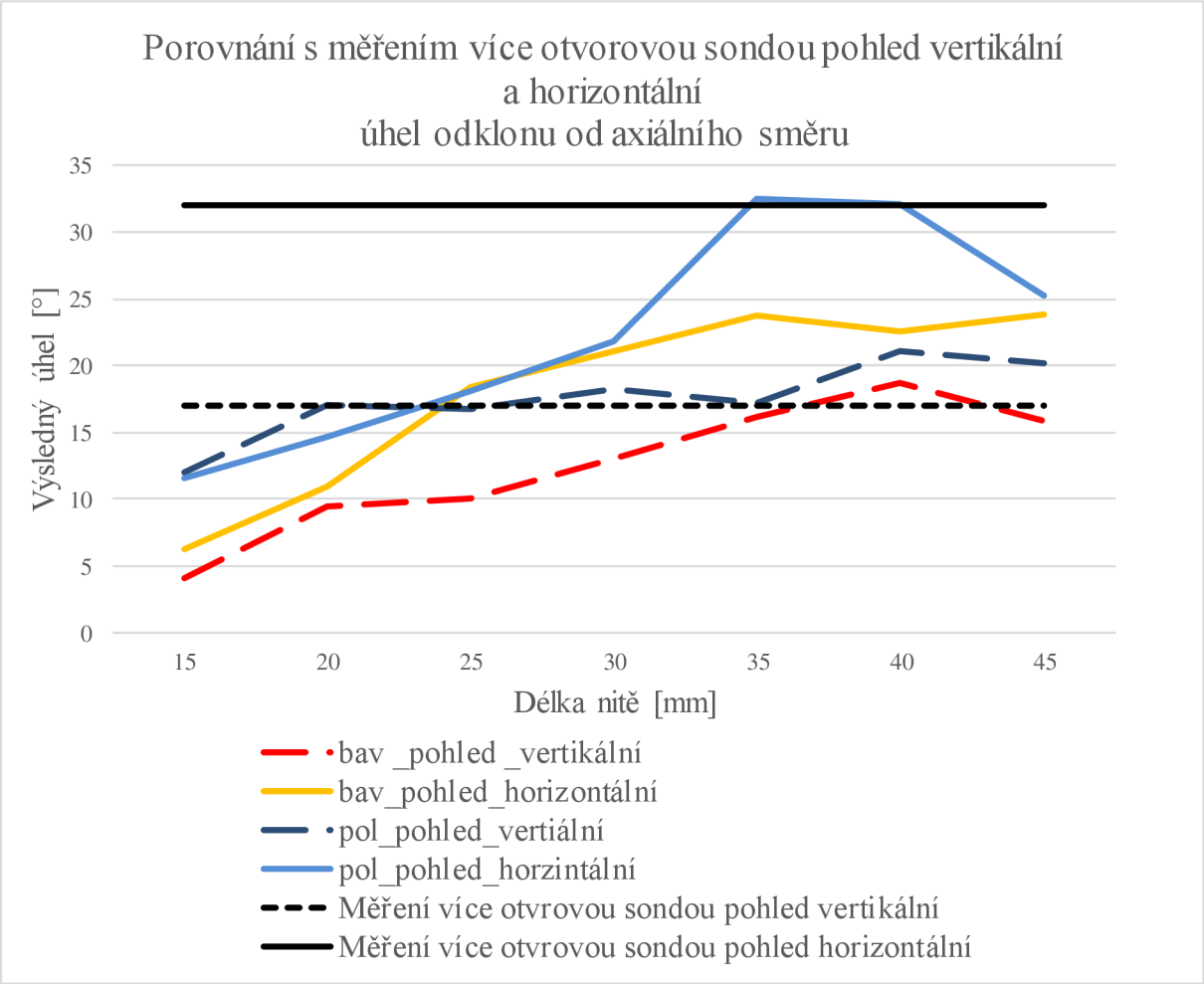
Obr. 38 Porovnání vlivu délky a materiálu nitě koncová 1/3

Druhý graf (obr. 38) znázorňuje výsledný úhel od koncové 1/3 bavlnky po konečný bod. Zde již není výběr tak jednoznačný a bavlnky zaznamenávají vyšší citlivost od délky 30 mm. Je to nejspíše způsobeno vlivem uchycení, který ztrácí efekt s rostoucí délkou bavlnky.

Z těchto měření vyplývá že nejvíce citlivé na proudění jsou nitě z materiálu bavlna o průměru 1 mm a polyesterová nit o průměru 0.5 mm.

Bylo provedeno další validační měření, kdy byly hodnoty porovnány s výsledky z měření více otvorovou sondou ve stejném bodě a za shodných okolních podmínek.

Tentokrát měření probíhalo ve dvou na sobě kolmých pohledech, (*obr. 39*) takže je znám vektor ve 3D. Měření z více otvorové sondy naměřilo v horizontálním směru uhel sklopení 32° a v vertikálním směru 17° vůči axiálnímu směru ventilátoru. V grafech znázorněno pomocí černé čáry. Těmto hodnotám se nejvíce přiblížila polyesterová nit s délkou 35 mm. Proto byl zvolena jako nit pro měření.

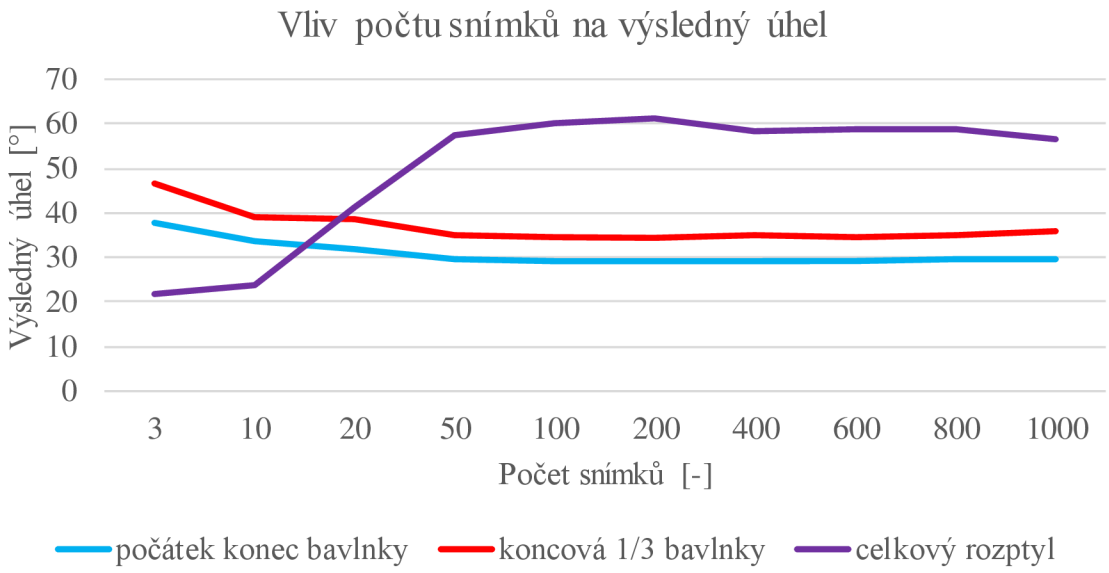


Obr. 39 Porovnání s měřením více otvorovou sondou pohled vertikální a horizontální

5.2 VLIV POČTU SNÍMKŮ

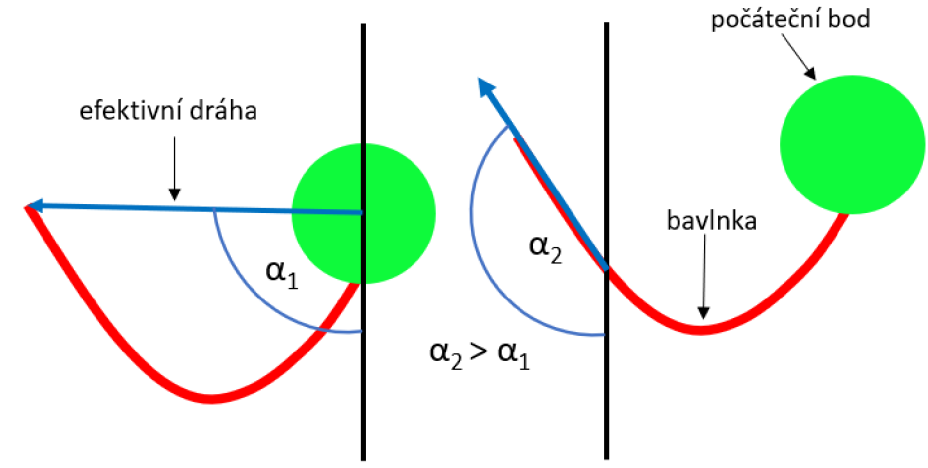
Na základě práce [27]. Kde jsou bavlnky také snímány pomocí klasické kamery, nikoliv vysokorychlostní. Určili počet snímků potřebný k vyhodnocení jako 1000. V případě této práce bylo provedeno měření zaměřené právě na nutný počet snímků viz . Potřebných k získání plné informace o pohybu bavlnky.

Z měření vyplývá že zhruba od 50 snímků se výsledné hodnoty mění již minimálně viz *obr. 40*. Pro samotné vyhodnocování bude využito alespoň 150 snímků. Protože, ne vždy jsou rozpoznány na snímku všechny bavlnky. Procentuální úspěšnost je vysoká, ovšem je nutné pohybovat na bezpečně straně intervalu. Kód pro vyhodnocování je opatřen počítadlem pro jednotlivé bavlnky. Tedy kolikrát byla zaznamenána jejich poloha. Podle toho jsou brány výsledky jako validní či nikoliv



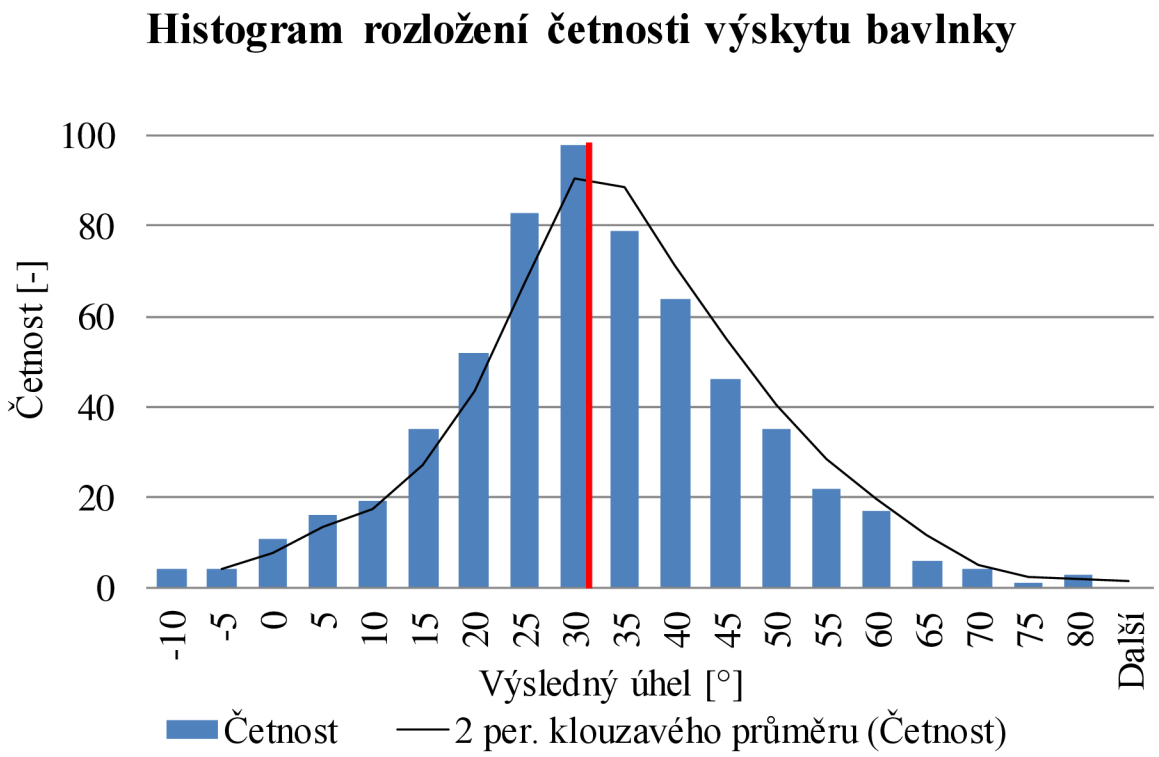
Obr. 40 Vliv počtu snímků na výsledný úhel

V práci dále uvádí, že jsou možné dva způsoby vyhodnocování viz *obr. 41*. A každý poskytuje mírně odlišné informace. První způsob vyhodnocuje směr od počátku tedy uchycení bavlnky po konec bavlnky. Výhodou je že známe přesný počáteční bod a tyto hodnoty je následně možné porovnat například s CFD výpočty. Na druhou stranu je směr ovlivněn právě zmíněným uchycením což zavadí nepřesnosti do měření. Druhý způsob funguje zcela opačně. Ukáže nám přesnější směr proudění, ovšem neznáme reálně působiště v prostoru.



Obr. 41 Způsoby vyhodnocení počátek – konec a koncová 1/3

Také byla provedení rozložení četnosti kdy na zobrazeném histogramu (obr. 42) lze vidět na příkladu 600 snímku. Normálové rozdělení odpovídá Gaussově křivce. Červenou linkou je pak následně vyznačena průměrná hodnota, která je 29.54°.



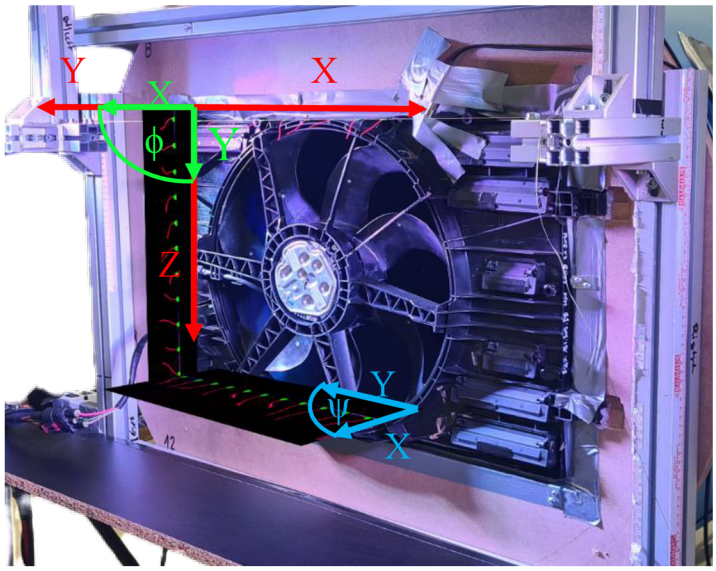
Obr. 42 Histogram rozložení četnosti výskytu bavlnky

5.3 SOUŘADNÉ SYSTÉMY

OpenCV knihovna má souřadný systém nastaveny vždy v levém horním rohu, kdy X+ směřuje doprava a Y+ směrem dolů. Na přiložené vizualizaci (obr. 43) je pak patrné, že je potřeba sjednotit souřadné systémy vertikálních fotografií a horizontálních se systémem posuvu měřícího stavu.

Měření probíhalo z leva doprava od vrchu dolů. Aby se předešlo práci se zápornými hodnotami byl zvolen červený souřadný systém.

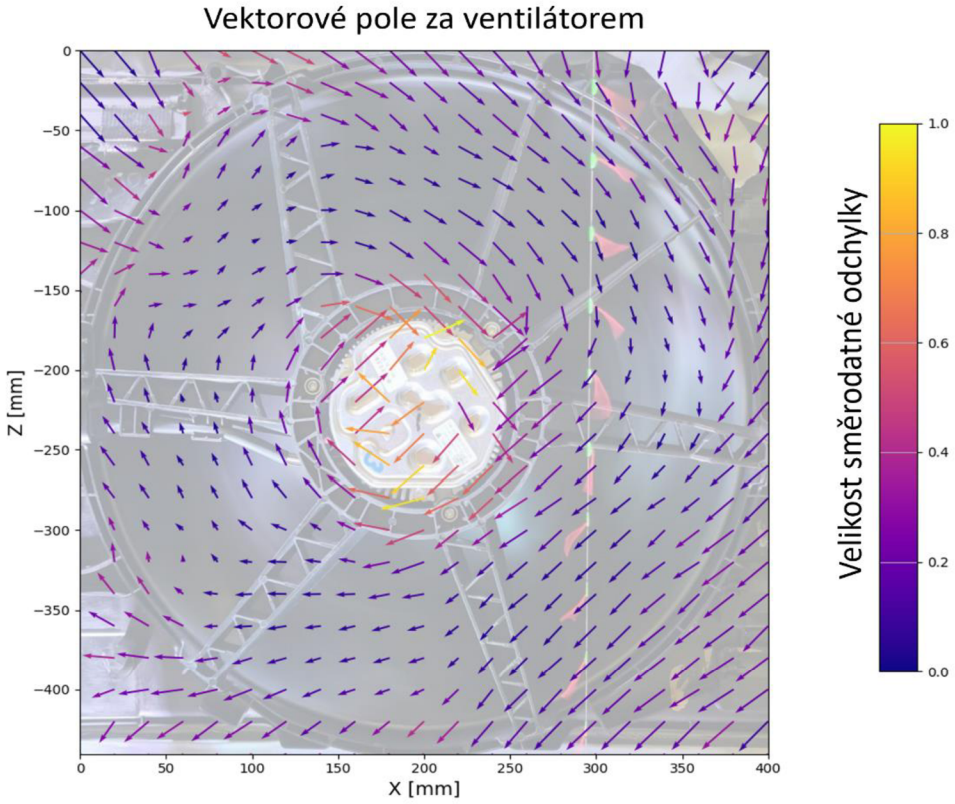
K dopočítaní směrového vektoru v prostoru bylo využito převodu úhlu na polární souřadnice tedy ve vertikální rovině na úhel ψ a ve vertikální na úhel ϕ. Protože z měření pomocí bavlnek není známá rychlost proudění byla velikost vektoru stanovena jako 1. Kombinací zmíněných úhlů pak bylo vyjádřeno směrování v prostoru



Obr. 43 Souřadné systémy

5.4 VÝSLEDKY

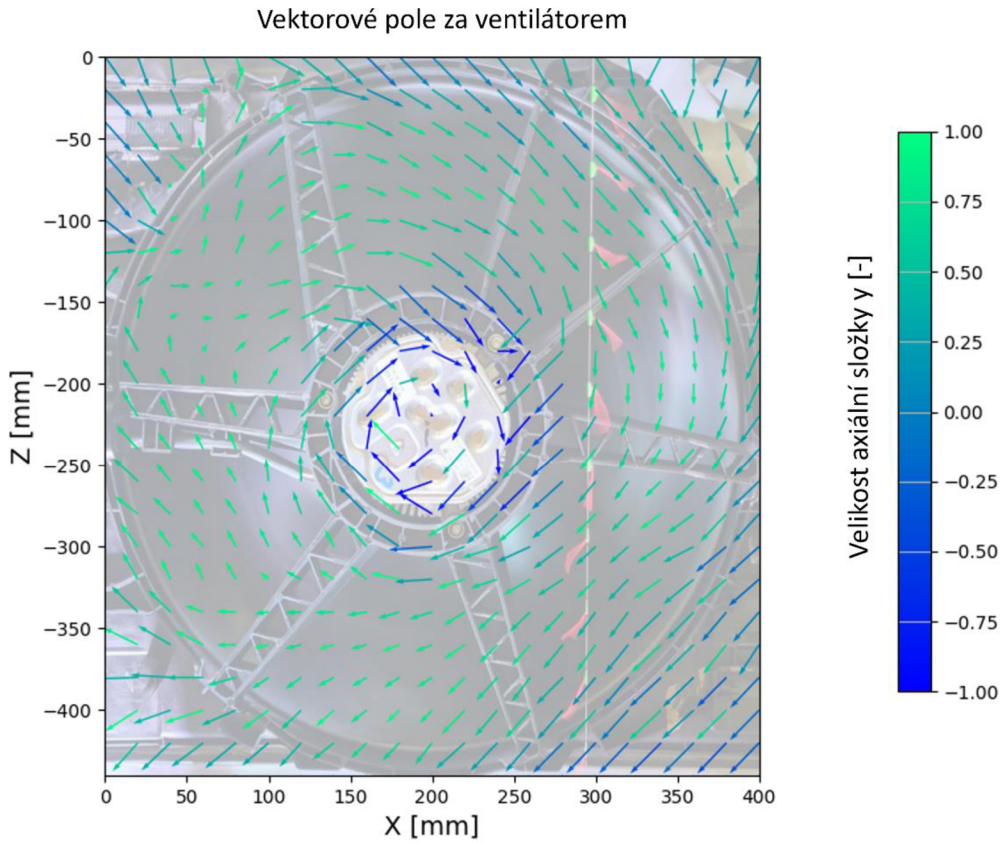
Cílem práce je obrazový výstup ve formě vektorového pole změřeného v rovině za ventilátorem. Pro co nejnázornější vizualizaci byl zvolen způsob promítnutí X a Z složek vektoru ve 2D. Y složka vektoru pak může být následně vykreslena v podobě zbarvení šipek vektorů.



Obr. 44 Vizualizace vektorového pole (počátek a konec bavlnky)

Na výsledné vizualizaci (*obr. 44*) je velmi dobře vidět, jak proudění kopíruje směr otáček ventilátoru. Náboj ventilátoru nasává vzduch z poza ventilátoru. Tím vzniká oblast velmi turbulentního proudění. Která je zvýrazněna nahodilými směry vektorů bavlnek a také zvýšenou hodnotou směrodatné odchylky. Ta svým způsobem znázorňuje právě oblasti, kde může být předpokládán vyšší výskyt turbulentního prouděni. Pro porovnání a lepší představu je vizualizace provedena s pozadím ventilátoru. Zároveň je na obrázku ponechána jedna série bavlnek. A lze vidět shodu výsledných směrových vektorů s aktuálním snímkem.

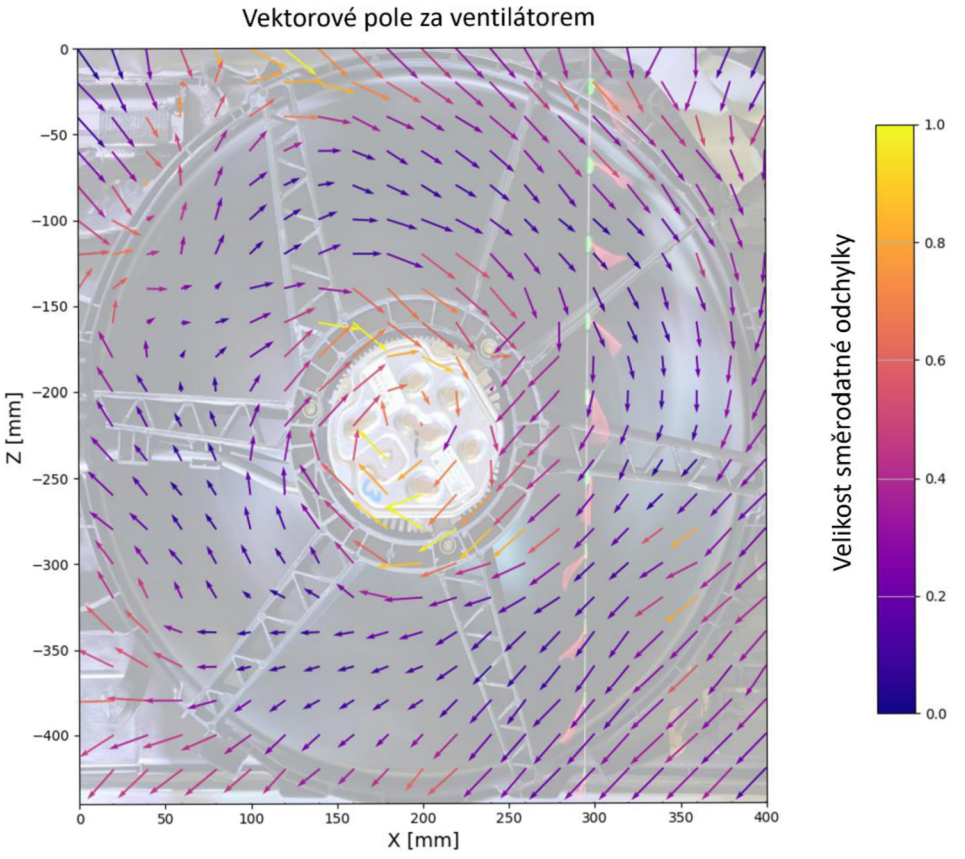
Důkazem toho že je vzduch do náboje nasávaný je právě vybarvení vektorů pomocí složky velikosti v axiálním směru Y viz *obr. 45*. Kde kladný směr vystupuje ven z ventilátoru ve směru proudění nasávaného vzduchu.



Obr. 45 vizualizace vektorové pole - velikost axiální složky

Naopak v krajních oblastech, jenž jsou nejvíce vzdáleny od lopatek ventilátoru. Převládá nad bavlnkami síla gravitační. A primárně směřují dolů v ose Z a tedy i proti rotaci proudu vzduchu z ventilátoru.

V třetím obrázku viz obr. 46 jsou znázorněny směry koncové třetiny bavlnky. Co se týče směru vektorů tak se ve výsledku liší velmi málo a hlavní rozdíl je ve velikostech směrodatné odchylky a výskytu takových oblastí s vyšší odchylkou.



Obr. 46 Vizualizace vektorového pole (koncová 1/3)

ZÁVĚR

Úvod této práce tvoří rešeršní, část věnující se metodám pro měření rychlostního pole, vhodných pro danou aplikaci proudění za ventilátorem osobního automobilu. Každá z nich má svoje výhody a nevýhody, a je vždy nutné zvážit na základě aplikace, zda je pro ni tato metoda vhodná či nikoliv. Jelikož většina metod vyžaduje speciální vybavení a metoda PIV i metoda více otvorové sondy již byla ve firmě Fluidea využita. Vychází z tohoto porovnání metoda sledování bavlnek pomocí kamery a následná obrazová analýza jako vítěz.

Aby bylo možné takovou analýzu vůbec provést, bylo nutné sestrojit měřící stav uzpůsobený právě pro měření bavlnek a to v prostoru, nikoliv na povrchu sledovaného tělesa jak je to běžné. Proto bylo zapotřebí sledovat pohyb bavlnky ze dvou, na sobě kolmých pohledů, aby byla získána plná informace o směrovém vektoru bavlnky v prostoru. Zároveň bylo nutné využít tzv. traverzování, k proměření celé zájmové oblasti. Před samotným měřením bylo také potřebné určit okrajové podmínky testu a to zejména materiál nitě a její délku. Protože se ukázalo, že má zásadní vliv na výsledný úhel. Dále je v práci vysvětlen způsob, jakým jsou bavlnky rozpoznávány. Jsou zde popsány nástroje, které k tomu byly využity. A zároveň i postup, který samotnému vyhodnocení musí předcházet, tedy úprava obrazu k zamezení šumu a redukci fragmentů vznikajících, například z odlesků nebo vlivem okolí.

Výsledkem je zmíněné vektorové pole za chladičem ventilátoru. To, alespoň trendově odpovídá očekávaným výsledkům a tomu, co je o proudění za ventilátorem známo. Například je na něm velmi dobře vidět recirkulace, vznikající za nábojem ventilátoru. Získaná data budou sloužit k porovnání s teoretickými výpočty a dalšími metodami, které byly již využity. Výsledky měření již byly konfrontovány s výsledky z více otvorové sondy při výběru vhodné délky a materiálu nitě.

Výhodou je, že vytvořený program může s lehkou úpravou sloužit i k jiným aplikacím. A to nejen sledování bavlnek, ale i například zaznamenávání pohybu klapek na ventilátorech. Výhodou této metody je její neinvazivnost, snadná aplikace a minimální požadavky na vybavení. Proto by metoda mohla být využita například i pro testování za reálných podmínek, tak jak bylo pro testování s bavlnkami zvykem. Sledování by mohlo sloužit například pro monitoring proudění z mřížek na chlazení brzd v podběžích nebo pro sledování mezní vrstvy třeba v okolí zpětných zrcátek.

Jako další krok spojený s touto problematikou se jeví určení chyby měření. Sestavit experiment, kde budou známy proudové charakteristiky a porovnat jaké přesné vlivy se promítají do odchylky vzniklé při měření pomocí bavlnek. Ať už se bude jednat o způsob aplikace bavlnky, nebo také o styl vyhodnocení jejího výsledného směru.

Dalším cílem je také ještě více automatizovat celý proces a minimalizovat práci operátora. Ideálním výsledkem by bylo vyhodnocování videozáznamu v reálném čase. Nebo aplikace stereo snímání a tedy získávání dat ve 3D při jednom měření.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

[1] VRUBEL, Vít. Návrh předního křídla vozu Formule Student [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/137256. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Michal Janoušek

[2] AEROSPACE, MECHANICAL & MECHATRONIC ENGG. 2005 UNIVERSITY OF SYDNEY. Velocity field. Online. 2005. Dostupné z: http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/aerothermal_dvd_only/aero/fprops/cvanalysis/node5.html. [cit. 2024-05-22].

[3] FOJTÁŠEK, Kamil. Hydromechanika: Proudění tekutin a základy hydrodynamiky. Online. In: . S. 141. Dostupné z: https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/338/.content/galerie-souboru/05_Hydrodynamika_3.pdf. [cit. 2024-05-22].

[4] BRDEČKO, R. Větrací systém automobilu - porovnání vlivu okrajových podmínek na proudění z různých typů vyústek. Brno, 2020. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/121459. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství 2020. 95 s. Vedoucí práce František Lízal.

[5] MALÍK, M., PRIMAS, J.: Anemometrické metody. [Učební text] Liberec, 2011. VLACH, R.: Tepelné procesy v mechatronických soustavách. Skripta. VUT Brno, 2009. [cit. 2024-05-22].

[6] BENSON, Tom. Pitot tube. Online. Dostupné z: https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/pitot.html. [cit. 2024-05-22].

[7] AEROPROBE CORPORATION. KIEL PROBE. Online. Dostupné z: https://www.aeroprobe.com/kiel-probes/. [cit. 2024-05-22].

[8] Kiel probe. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2023. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Kiel_probe. [cit. 2024-05-22].

[9] JACUZZI, Eric a GRANLUND, Kenneth. Passive flow control for drag reduction in vehicle platoons. Online. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2019, roč. 189, s. 104-117. ISSN 01676105. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.03.001. [cit. 2024-05-22].

[10] PIOLA, Giorgio a SOMERFIELD, Matt. WHAT FERRARI'S NEW RAKE TELLS US ABOUT ITS 2021 F1 CAR. Online. In: . 15.prosince 2020n. l. Dostupné z: https://www.motorsport.com/f1/news/what-ferraris-new-rake-tells-us-about-its-2021-f1-car/4927288/. [cit. 2024-05-22].

[11] AEROPROBE CORPORATION. RAKES. Online. Dostupné z: https://www.aeroprobe.com/rake-probe/. [cit. 2024-05-22].

[12] TELIONIS, Demetri a YANG, Yihong. Recent Developments in Multi-Hole Probe (MHP) Technology. Online. S. 29. Dostupné z: https://abcm.org.br/anais/cobem/2009/pdf/COB09-3415.pdf. [cit. 2024-05-22].

[13] NASA. FIVE HOLE PROBE - FLOW DIRECTION. Online. 2021. Dostupné z: https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/tunp5h.html. [cit. 2024-05-23].

[14] BASIC AIR DATA. Multi-Hole Probe MHP. Online. 2021. Dostupné z: https://www.basicairdata.eu/knowledge-center/measurement/multi-hole-probe-mhp/. [cit. 2024-05-23].

[15] LINDA AND BIPIN DOSHI DEPARTMENT OF CHEMICAL & BIOCHEMICAL ENGINEERING. Hot wire anemometry (HWA) technique. Online. Dostupné z: https://web.mst.edu/aldahhanm/components/research/techniques/hotWireAnemometry.html. [cit. 2024-05-23].

[16] DANTEC DYNAMICS. Measurement Principles of CTA. Online. Dostupné z: https://www.dantecdynamics.com/solutions/fluid-mechanics/constant-temperature-anemometry-cta/measurement-principles-of-cta/. [cit. 2024-05-24].

[17] DANTEC DYNAMICS. Hot-wire and Hot-film Probes Online. Dostupné z: https://www.dantecdynamics.com/components/hot-wire-and-hot-film-probes/ [cit. 2024-05-24].

[18] VRBICKÝ, J. Senzor měření rychlosti proudění vzduchu v elektrickém stroji. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 40 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D

[19] Prof. Ing. Václav Uruba, CSc. ANEMOMETRIE - ŽHAVENÉ SENZORY. Online. Dostupné z: http://www2.it.cas.cz/~uruba/docs/HW/PA.pdf. [cit. 2024-05-23].

[20] Prof. Ing. Václav Uruba, CSc. Měření rychlosti - Laser Doppler Anemometry. Online. Dostupné z: http://www.it.cas.cz/~uruba/docs/ZIE/LDA.pdf. [cit. 2024-05-23].

[21] PAVELEK, Milan; JANOTKOVÁ, Eva a ŠTĚTINA, Josef. Vizualizační a optické měřicí metody. Online. In: . 2007. Dostupné z: https://eu.fme.vutbr.cz/file/vomm/0000.htm. [cit. 2024-05-23].

[22] Prof. Ing. Václav Uruba, CSc. Měření rychlosti - Laser Doppler Anemometry. Online. Dostupné z: http://www.it.cas.cz/~uruba/docs/ZIE/LDA.pdf. [cit. 2024-05-23].

[23] Prof. Ing. Václav Uruba, CSc. Particle image velocimetry (PIV). Online. Dostupné z: http://www2.it.cas.cz/~uruba/docs/ZIE/PIV.pdf. [cit. 2024-05-23].

[24] RATKOVSKÁ, Katarína. Particle Image Velocimetry Publication. Online. S. 26. Dostupné z: https://home.zcu.cz/~rcermak/opvk_htt/VY_01_02.pdf. [cit. 2024-05-24].I

[25] NASA. Smoke and tufts. Online. Grc.nasa.gov. 2021. Dostupné z: https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunvsmoke.html. [cit. 2024-05-23].

[26] RISTIC, Slavica. Flow Visualisation Techniques in Wind Tunnels Part I – Non optical Methods. Online. Scientific Technical Review,Vol.LVII,No.1,2007. Roč. 2007, s. 13. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/267296233_Flow_Visualisation_Techniques_in_Wind_Tunnels_Part_I_-_Non_optical_Methods. [cit. 2024-05-24].I

[27] WIESER, Dirk; BONITZ, Sabine; LOFDAHL, Lennart; BRONIEWICZ, Alexander; NAYERI, Christian et al. Surface Flow Visualization on a Full-Scale Passenger Car with Quantitative Tuft Image Processing. Online. 2016, s. -. Dostupné z: https://doi.org/10.4271/2016-01-1582. [cit. 2024-05-22].I

[28] MA, Shuang a CHEN, Lin. Digitalization and Quantitative Flow Visualization of Surrounding Flow over a Specially-Shaped Column-Frame by Luminescent Mini-Tufts Method. Online. Aerospace. 2022, roč. 9, č. 9, s. 12. ISSN 2226-4310. Dostupné z: https://doi.org/10.3390/aerospace9090507. [cit. 2024-05-22].

[29] GOPRO COMMUNITY. HERO12 Black: Digital Lenses FOV Information. Online. Dostupné z: https://community.gopro.com/s/article/HERO12-Black-Digital-Lenses-FOV-Information?language=en_US. [cit. 2024-05-24].

[30] B & H FOTO & ELECTRONICS CORP. GoPro HERO12 Black Specs. Online. Www.bhphotovideo.com. Dostupné z: https://www.bhphotovideo.com/c/product/1781065-REG/gopro_chdhx_121_cn_hero12_black_action_camera.html/specs. [cit. 2024-05-24].

[31] RODRÍGUEZ, Roberto a SOSSA, Juan H. Mathematical Techniques for Biomedical Image Segmentation. Online. Encyclopedia of Biomedical Engineering. Roč. 2019, s. 64-78. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801238-3.99989-6. [cit. 2024-05-24].

[32] UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI. Obrazová analýza. Online. Dostupné z: https://biologie.upol.cz/mikroskopie/obrazova%20analyza.htm. [cit. 2024-05-24].

[33] PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. Python. Online. 2021. Dostupné z: https://www.python.org/doc/essays/blurb/. [cit. 2024-05-24].

[34] OPENCV. OpenCV Introduction. Online. 2024. Dostupné z: https://docs.opencv.org/4.x/d1/dfb/intro.html. [cit. 2024-05-24].

[35] NUMPY. Learn. Online. 2024. Dostupné z: https://numpy.org/learn/. [cit. 2024-05-24].

[36] RGB color model. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2024. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/RGB_color_model. [cit. 2024-05-24].

[37] Computer Vision. Online. 2021. Dostupné z: https://cvexplained.wordpress.com/2020/04/28/color-detection-hsv/. [cit. 2024-05-24].

[38] HLAVÁČ, Václav. Matematická morfologie. Online, Přednášky. České vysoké učení technické v Praze Fakulta elektrotechnická, katedra kybernetiky Centrum strojového vnímání: České vysoké učení technické v Praze Fakulta elektrotechnická. Dostupné z:

https://cw.fel.cvut.cz/old/_media/courses/a6m33zmo/71-3matmorpholbincz.pdf. [cit. 2024-05-24].THYSSEN, Anthony. Morphology of Shapes. Online. 2010, 2013. Dostupné z: https://imagemagick.org/Usage/morphology/. [cit. 2024-05-24]

[39] THYSSEN, Anthony. Morphology of Shapes. Online. 2010, 2013. Dostupné z: https://imagemagick.org/Usage/morphology/. [cit. 2024-05-24].

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ČSN		česká technická norma
n	[min^{-1}]	Otáčky ventilátoru
ρ	[$kg \cdot m^{-3}$]	hustota kapaliny
CCA	[–]	Constant current anemometry
CTA	[–]	Constant Temperature Anemometry
2D	[–]	Two dimensional
3D	[–]	Three dimensional
PT100	[–]	Teplotní senzor
NTC	[–]	negative temperature coefficient
LED	[–]	light-emitting diode
RGB	[–]	red green blue
CFD	[–]	Computational fluid dynamics
PIV	[–]	Particle Image Velocimetry
LDA	[–]	Laser Doppler velocimetry
HSV	[–]	Hue, Saturation, Value
F1	[–]	Formula 1
PETG	[–]	Polyetyléntereftalát – glykol
MP	[–]	Megapixel
CMOS	[–]	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor

SEZNAM PŘÍLOH

Tab. 3 Metody měření proudového pole

Metoda	Rychlost	Směr proudění	Zavadění částic	Speciální vybavení	Komerčně dostupné	Požadované osvětlení
PIV	ano	ano	ano	ano	ano	ano, lasery
LDA	ano	ano	ano	ano	ano	ano, lasery
Termoanemometrie	ano	ano	ne	ano	ano	ne
Víceotvorové sondy	ano	ano	ne	ano	ano	ne
Bavlnky	ne	ano	ano	ne	ne	LED osvětlení

Metoda	Vizuální přístup	Fyzický přístup	Ovlivnění lokálního proudění	Styl měření	Vyhodnocení v reálném čase	Složitost obsluhy
PIV	ano	ne	ne	rovina	ano	vysoká
LDA	ano	ne	ne	bod	ne	vysoká
Termoanemometrie	ne	ano	ano	bod	ano	střední
Víceotvorové sondy	ne	ano	ano	bod	ano	střední
Bavlnky	ano	ne	ano	rovina	ne	nízká