

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Ústav energetických materiálů

Vizualizace pomocí šlírové techniky

Štěpán Jirman

Bakalářská práce

2021

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Štěpán Jirman**
Osobní číslo: **C18028**
Studijní program: **B2802 Chemie a technická chemie**
Studijní obor: **Chemie a technická chemie**
Téma práce: **Vizualizace pomocí šlírové techniky**
Zadávací katedra: **Ústav energetických materiálů**

Zásady pro vypracování

1. Provedte literární rešerši na téma vizualizace pomocí šlírové techniky.
2. Vyberte aplikace vhodné pro studium dějů souvisejících s oborem energetických materiálů.
3. Výsledky zpracujte formou bakalářské práce.

Rozsah pracovní zprávy:
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jiří Pachman, Ph.D.**
Ústav energetických materiálů
Oponent bakalářské práce: **Ing. Jakub Šelešovský, Ph.D.**
Ústav energetických materiálů
Datum zadání bakalářské práce: **26. února 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **2. července 2021**

L.S.

prof. Ing. Petr Kalenda, CSc.
děkan

doc. Ing. Miloš Ferjenčík, Ph.D.
vedoucí ústavu

V Pardubicích dne 28. února 2020

Prohlašuji:

Práci s názvem "Vizualizace pomocí šlírové techniky" jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 2. 7. 2021

Štěpán Jirman

Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu doc. Ing. Jiřímu Pachmanovi, Ph.D. za všeobecné vedení v práci a vysvětlování nejasností. Dále pak Ing. Jindřichu Kučerovi za pomoc při práci v laboratoři a ukazování možností post processingu. Také bych chtěl poděkovat panu prof. Ing. Čestmíru Drašarovi Dr. za vedení v oblasti optiky lámání světla. Děkuji panu prof. Garymu S. Settlesovi za pomoc s hledáním použitelných literárních materiálů. Děkuji panu M.S. Joshovi Weisbergerovi, Ph.D. za pomoc s úpravou jeho vyhodnocovacího programu. Děkuji měmu bratru Bc. Janu Jirmanovi za pomoc při práci s editorem LaTeX.

ANOTACE

Bakalářská práce se zabývá možností využití šlírové (schlieren) zobrazovací techniky pro obor energetických materiálů. Práce pojednává o tom, co to vlastně technika schlieren je, jak funguje a jak by se data získaná z pozorování mohla využít pro studium chování rázových vln. Součástí práce jsou popisy možných uspořádání pozorovacích sestav a jednoduché experimenty s rychloběžnou kamerou. Práce také zmiňuje a vysvětluje techniku schlierenu orientovaného na pozadí, ilustrovanou na experimentu.

KLÍČOVÁ SLOVA

BOS, schlieren orientovaný na pozadí, lom světla, schlieren, rázová vlna, výbušiny

TITLE

Visualization using schlieren techniques

ANNOTATION

This thesis deals with the possibility of using schlieren visualization technique for the field of energetic materials. The thesis discusses the details about what the schlieren visualization technique is, how it works and how the data gathered from experiments, using this technique, can be utilized for the study of blast wave behavior while reflecting or bending around an obstacle. The thesis further describes possible observational setups and easy experiments with a high speed camera. Thesis also mentions and explains the background oriented schlieren technique illustrated on an experiment.

KEYWORDS

BOS, background oriented schlieren, light refraction, schlieren, blast wave, explosives

OBSAH

Seznam obrázků	9
Seznam zkratek	11
Úvod	12
1. Teoretická část	13
1.1 Historie techniky	13
1.2 Lom světla	13
1.3.1 Lom světla v tuhých látkách	15
1.3.2 Lom v plynných látkách	16
1.3.3 Lom světla v rázové vlně	17
1.2 Princip schlierenové techniky	17
1.4 Možnosti uspořádání sestav	19
1.4.1 Jednozrcadlová sestava	19
1.4.2 Dvouzrcadlová sestava	19
1.4.3 Sestava se spojnými čočkami	21
1.4.4 Možné modifikace sestav	21
1.5 Schlieren orientovaný na pozadí	22
1.6 Aplikace v oboru energetických materiálů	23
2. Experimentální část	25
2.1 Popis měření	25
2.1.1 Sestava na ÚEnM	25
2.1.2 Sestava pro experiment BOS	26
2.2 Popis experimentu	27
2.2.1 Zahoření propan-butanu vypuštěného ze zapalovače	27
2.2.2 Zahoření propan-butanové bubliny	27
2.2.3 Exploze acetylidu stříbrného	28
2.2.4 Experiment pro BOS	28
2.3 Popis vyhodnocení	28
2.3.1 Experimenty v laboratoři	29

2.3.2 Experiment BOS	29
3. Výsledky a diskuze	30
3.1 Škrtnutí zapalovačem	30
3.2 Zahoření propan-butanové bubliny	30
3.3 Výsledek exploze acetylidu stříbrného	31
3.1 Výsledek experimentu BOS	31
Závěr	33
Použitá Literatura	34
Příloha A	38

SEZNAM OBRÁZKŮ

1	Lomy paprsků na rozhraních materiálů	15
2	Lomy paprsků v kruhovém průřezu	16
3	Graf tlakového průběhu vzdušné rázové vlny	18
4	Schéma jednozrcadlové soustavy [16]	19
5	Schéma Z uspořádání [16]	20
6	Schéma U uspořádání [18]	21
7	Schéma uspořádání s čočkami [16]	21
8	Výsledný obrázek ze sestavy s barevným filtrem [20]	22
9	Obrázky šíření vzdušných rázových vln po výstřelu [22]	22
10	Obrázky šíření a spojování vzdušných rázových vln [24][25]	24
11	Obrázky šíření rázových vln v trupu letadla [26][27]	24
12	Obrázek spalín proudících z raketové trysky [28]	24
13	Fotka sestavy na ÚEnM	25
14	Detail štěrbinu u zdroje světla a žiletkové krabičky u kamery	26
15	Schéma experimentu pro BOS	26
16	Fotky vyrobeného generátoru bublin. Nalevo pohled shora na ústí hadiček. Uprostřed pohled zespodu na umístění zapalovače a injekční stříkačky. Vpravo pohled shora na provrtané víčko	28
17	Několik snímků škrtnutí zapalovačem, záznam ze sestavy na ÚEnM	30
18	Prasknutí a zahoření PB bubliny	31
19	Exploze acetylidu atříbrného	31
20	Snímky z původního videa pro porovnání	32
21	Několik snímků výsledného videa	32
22	Kód před úpravou	38
23	Kód po úpravě	39
24	Příkazový řádek 1	39
25	Příkazový řádek 2	39
26	Příkazový řádek 3	40
27	Příkazový řádek 4	40
28	Nápověda na počet snímků	40
29	Uložené snímky	41

30	Okno souboru GUI BOS v2.m	41
31	Okno souboru GUI BOS v2.m s vyplněnými údaji	43

SEZNAM ZKRATEK

PDF	Portable Document Format
BOS	Background Oriented Schlieren
GUI	Graphical User Interface
FSS	Full Scale Schlieren
VRV	Vzdušná Rázová Vlna

ÚVOD

Tato práce se zabývá možností využití šlírové (schlieren) zobrazovací techniky. Cílem práce je provést literární rešerši na téma šlírové techniky, vybrat aplikace vhodné pro studium dějů souvisejících s oborem energetických materiálů a otestování možností dostupné techniky.

Schlieren je optická zobrazovací technika, která umožňuje pozorování jevů v běžně průhledných médiích. Kořeny techniky sahají až do 17. století, odkdy byla použita hlavně pro zjišťování ohniskových vzdáleností čoček a dalekohledových zrcadel. Od té doby technika našla aplikace v různých vědeckých disciplínách.

Tato vizualizační technika má mnoho aplikací, jdou s ní zobrazit jevy jako: stoupání teplého vzduchu z dlaně, šíření vzduchu při kýchnutí nebo konverzaci, obtékání vzduchu kolem překážek ve větrném tunelu, turbulence způsobené letadly při vzletu či přistání a v neposlední řadě rázové vlny.

Je založena na rozdílech indexů lomu homogenních plynných médií. Tedy na tom, že světelné paprsky procházející skrze oblast s rozdílnou hustotou se odchylojí od původního směru. Odchýlené paprsky jsou dále odstíněny, což vytvoří obraz míst s jiným indexem lomu než okolí.

V této práci byla technika použita pro zobrazení zahoření propan-butanu ze zapalovače, směsi propan-butanu se vzduchem v bublině a zobrazení rázových vln způsobených explozemi acetylidu stříbrného a nálože TNT.

První část práce obsahuje literární rešerši na téma vizualizace pomocí šlírové techniky a jejího možného použití pro obor energetických materiálů. V další části bylo provedeno několik experimentů na dostupných sestavách. Výsledky experimentů jsou diskutovány na konci práce.

1. TEORETICKÁ ČÁST

Teoretická část obsahuje stručnou historii techniky, základy optiky lomu světla v pevném a plyném skupenství, samotný princip vizualizační techniky, možnosti uspořádání experimentálních sestav a techniky shliereny orientovaného na pozadí.

1.1 Historie techniky

Počátky této techniky sahají až do 17. století. První očlověkem, o kterém je známo, že se zabýval jevy v průhledném homogenním prostředí, byl Robert Hooke. V době, kdy si optické přístroje jako mikroskop a dalekohled získávaly oblibu u mnoha amatérských nadšenců si všiml, že obraz vytvořený těmito nástroji je spojen s médiem, skrze které věci pozoroval. Myslel si, že optika nehomogenních médií je nový vědecký obor, který popsal ve své knize *Micrographia*, pozorování LVIII [1]. V ní diskutoval o tom, jak by rozdíly hustot v atmosféře mohly být důvodem pro „blikání“ hvězd blízko horizontu, včetně slunce blízko vrcholů hor, nebo špiček stromů. Jeho schlierenovým experimentem (který by bylo lepší nazvat stínografickým) bylo pozorování vzduchu narušeného teplem stoupajícím ze svíčky pozorované čočkou s druhou svíčkou jako zdrojem světla. Práce Hooke však byla zapomenuta. Dalším člověkem, který se o tyto jevy zajímal byl Jean Paul Marat. Ačkoli revolucionář, byl oddaný vědec a jako první publikoval skutečný náčrt svého pozorování tepelných oblaků vytvořených ohřátými objekty [2]. Jeho kresby zobrazovaly i přechod z laminárního na turbulentní proudění, ale to bylo objeveno a studováno až Osbornem Reynoldsem. Maratova role v revoluci způsobila velké pochybnosti o jeho vědecké práci a jeho práce byla zpochybňována. Po Maratovi použil Leon Foucault [3] svou techniku k testování dalekohledových zrcadel, což umožnilo konstrukci přesnějších dalekohledů. Byl prvním, kdo pomocí ostré hrany zablokoval část světelných paprsků v jeho sestavě. Foucault se však zastavil pouze při testování zrcadel a čoček a nezajímal se o sledování proudění vzduchu. Henry Draper publikoval náčrt horkého vzduchu stoupajícího z ruky a tvrdil, že by mohl narušit snímky zobrazované dalekohledy, pokud by nebyly zohledněny při manipulaci se zrcadly [4]. Přibližně ve stejné době August Toepler objevil Hookova pozorování a s pár úpravami (včetně zařazení ostré hrany do sestavy) ji použil k pozorování nehomogenit ve skle. Na základě toho pojmenoval techniku „Schlieren“ (německy šmouha). Detailnější popis historie lze nalézt v knize *Schlieren and shadowgraph techniques* [5].

1.2 Lom světla

Zobrazování technikou schlieren je proces, který umožňuje pozorovat jevy v průhledných médiích, jako horký vzduch stoupající z plamene svíčky nebo vypařování organických těkavých látek. Je založeno na faktu, že různé hustoty plynů (průhledných médií) mají různé indexy lomu [5]. Index lomu je vlastnost materiálu, která určuje, jak moc jsou ovlivňovány elektromagnetické vlny (záření) procházející daným materiálem. Index lomu n je určen poměrem rychlosti světla ve vakuu c a rychlosti světla v daném materiálu c_0 . Výpočet je v rovnici 1 [6].

$$n = \frac{c}{c_0} \quad (1)$$

Index lomu je bezrozměrná veličina a jako příklad lze uvést hodnotu 1 ve vzduchu, 2,42 v diamantu nebo běžná skla 1,4 až 1,9 [6].

Při interakci záření s materiálem může dojít k několika situacím. Materiály, kterými světlo prostupuje, jsou nazývány optickým prostředím. Optické prostředí může být průhledné, průsvitné, nebo neprůhledné. Průhledné prostředí je takové, kde většina světla projde skrz beze změny a lze skrze něj vidět (čiré materiály, sklo, voda). Průsvitné prostředí je takové, kde světlo při průchodu nepravidelně mění směr. Takové materiály se jeví jako matné. Neprůhledné prostředí je takové, kde se veškeré světlo odrazí na rozhraní materiálu a neprojde dovnitř, nebo se v něm všechno absorbuje [6].

Světlo má duální povahu, to znamená, že se chová jako vlnění, ale i jako částice, která má určitou energii závislou na vlnové délce světla (foton) [7]. Foton může svou energii předat při srážce s částicí materiálu danému atomu nebo molekule, ty přejdou do metastabilního excitovaného stavu a po chvíli zase zpět za opětovného vyzaření původní energie. To znamená, že foton bude pokračovat dál materiálem, ale bude se zdržovat při každé srážce s atomem nebo molekulou. Většina fotonů viditelného záření nemá dost energie na dostání atomu do metastabilní fáze. Tady nastává jev, který by se dal nazvat půjčka energie od vakua respektive od kvantových fluktuací ve vakuu. Dochází k tomu, že si na malý okamžik půjčí akorát tolik energie na excitaci atomu a po návratu zpět ji opět odevzdá [8][9].

Na vztah mezi množstvím půjčené energie a časem stráveným v metastabilní fázi se dá aplikovat Heisenbergův princip neurčitosti. Ten obecně udává, že součin daných dvou veličin musí dávat stále stejné číslo. Tedy když se jedna zvětší, druhá se musí úměrně zmenšit (případně čím přesněji je změřena jedna, tím hůře se určí druhá)[10]. V praxi to znamená, že fotony, které si musí půjčit více energie (s delšími vlnovými délkami, jako červená barva) se mohou zdržet

v materiálu pouze krátkou dobu, zatímco fotony, které si půjčí méně tam zůstávají déle. To je důvod proč se fialová barva láme nejvíce (je nejvíce zpomalená) a červená nejméně [9].

Definovaná rychlost světla ve vakuu je taková, kde k takovýmto srážkám a zpomalením nedochází. V každém jiném materiálu však k interakcím docházet bude, a tak se světlo bude pohybovat o něco pomaleji. Index lomu je koeficient toho kolikrát větší je rychlost světla ve vakuu než jeho rychlost v dané látce.

1.2.1 Lom světla v tuhých látkách

Přechod světla přes rozhraní dvou materiálů o různých indexech lomu má za následek odklonění světla od původního směru. Velikost odklonu a směr závisí na poměru indexů lomu obou prostředí a na úhlu dopadu paprsku. Paprsek, který dopadne kolmo na povrch se nikam neláme a neodklání, ten projde kolmo skrz beze změny směru, ovšem bude fázově posunutý vůči rovnoběžnému paprsku, který neprošel přes rozhraní materiálů [9].

Paprsek, který dopadne pod jiným úhlem se bude chovat podle toho, o jaké rozhraní se jedná. Pokud půjde z prostředí s menším indexem lomu do prostředí s větším, bude se lámat „ke kolmici“ pokud obráceně, bude se lámat „od kolmice“, viz obrázek 1.



Obrázek 1: Lomy paprsků na rozhraních materiálů

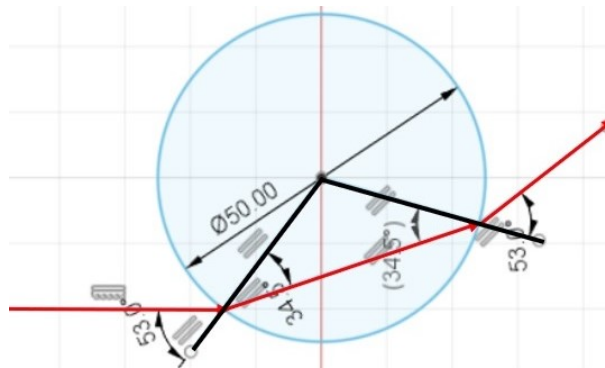
Modrá oblast znázorňuje prostředí s větším indexem lomu. Černá čára je kolmice k rozhraní v místě dopadu paprsku a červené šipky jsou paprsky. Úhel mezi dopadajícím paprskem a kolmicí je α a úhel mezi lomeným paprskem a kolmicí je β . Funkce *sinus* těchto úhlů společně s indexy lomu (n_1 pro první prostředí a n_2 pro druhé) lze zapsat do rovnice 2.

$$n_1 * \sin \alpha = n_2 * \sin \beta \quad (2)$$

Z té lze pomocí známých indexů lomu a úhlu dopadu paprsku spočítat úhel lomeného paprsku [6][11].

Pokud by levý a pravý obrázek z obr.1 byly zařazeny za sebe, tedy průchod skrze těleso a následné vrácení do původního prostředí. Bude vidět, že paprsek, který opouští těleso je rovnoběžný s tím, který vcházel, ale je fázově a prostorově posunutý [6][9].

Toto platí pro tělesa, která mají rovnoběžné strany s rozhraními indexů lomu. Pokud by světelné paprsky procházely tělesem, které tomuto neodpovídá, bude výsledný paprsek skutečně vychýlený. Na obrázku 2 je zobrazen lom v kruhovém průřezu s vyznačenými velikostmi úhlů. Je počítáno s indexem lomu 1,4 (běžné sklo), jak je vidět, úhly na jednotlivých rozhraních jsou opačné, ale stejně velké. Kvůli jinému umístění kolmice u prvního a druhého rozhraní se paprsek nenarovná, naopak se ještě více ohne [6][9]. Tento efekt bude znatelnější, čím půjdeme paprskem blíže ke straně kruhu.



Obrázek 2: Lomy paprsků v kruhovém průřezu

Při přechodu paprsku z jednoho prostředí do druhého nikdy není přechod dokonalý, vždy dojde k částečnému odrazu pod stejným úhlem, jako dopadlo původní světlo na rozhraní [9]. Jiná možnost odrazu je důležitější, pokud paprsek prochází z prostředí s větším indexem lomu do prostředí s menším, může nastat jev, který se jmenuje *úplný odraz*[6]. To nastává, když úhel β je roven devadesáti stupňům. To je když se paprsek po lomu pohybuje přesně rovnoběžně po rozhraní materiálů. Pro takovýto úhel je stanoven tzv. *mezní úhel* α . Všechny paprsky dopadající na rozhraní se stejným nebo větším úhlem než je mezní úhel budou odraženy zpět dovnitř. Mezní úhel se dá spočítat podle rovnice 3 [6].

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right), \quad (3)$$

1.2.2 Lom světla v plynných látkách

Lom světla se také vyskytuje u plynných látek. U zobrazování shlieren technikou je spoléháno právě na to, že rozdíl indexu lomu vzduchu a daného plynu (kterým může být opět vzduch, jen s jinou teplotou či tlakem) je dostatečně velký, aby bylo ohnutí paprsku registrovatelné. Protože však plynné látky mají nízkou hustotu (tedy dochází méně ke srážkám atomů s fotony jak bylo vysvětleno ve druhém odstavci na straně 14). Indexy lomu plynných látek jsou si navzájem velmi blízké. Liší se v desetitisícinách až stotisícinách. Pro představu jsou některé uvedeny zde: index lomu vzduchu = 1,000293, helia = 1,000036, vodíku = 1,000132. Hodnoty byly stanoveny při 0°C a 1 atm [12].

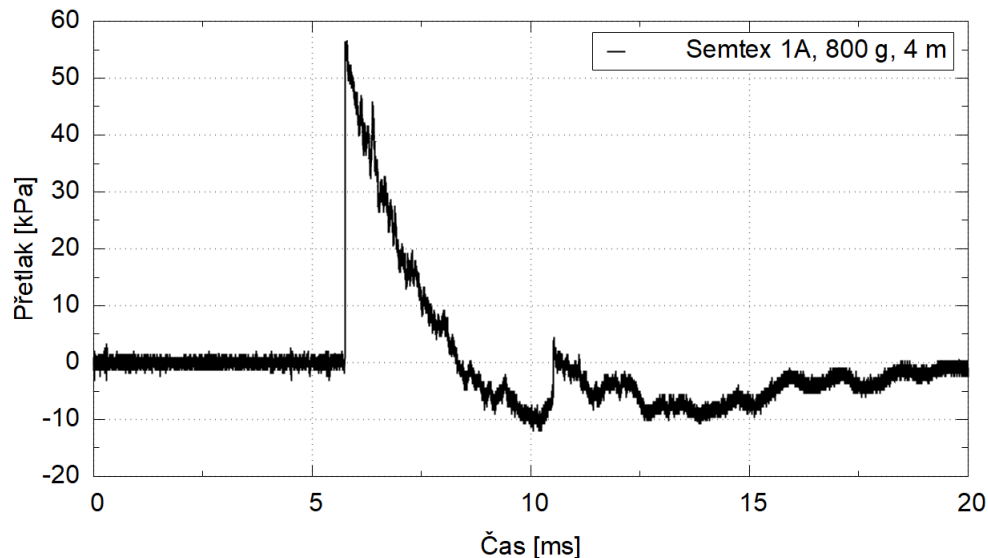
Index lomu je sekundárně závislý na teplotě. To znamená, že ho nemění změna teploty, ale změna jiné veličiny, která se mění s teplotou. Teplota ovlivňuje pohyb atomů a molekul ze kterých se materiál skládá, tedy hustotu materiálu. Na základě změny hustoty, tedy změny počtu srážek procházejícího fotonu s částicemi hmoty, světlo prochází různě dlouho, a mění se tak index lomu [13].

1.2.3 Lom světla v rázové vlně

Rázová vlna je tlaková vlna způsobená explozí či jiným náhlým jevem, která se pohybuje rychleji než zvuk. V této práci je zaměření na vzdušnou rázovou vlnu, tedy na tlakovou vlnu pohybující se rychleji než asi 340 m/s ve vzduchu. Nicméně rázové vlny se mohou šířit i pevnými a kapalnými materiály [14].

Při řešení lomu světla v rázové vlně je třeba nezanedbat několik faktů. Je to vlastně stlačený plyn, takže bude mít malý index lomu. Zároveň bude závislý na teplotě a tlaku. Také kvůli tlakovému průběhu rázové vlny (nejdříve vysoký tlak a pak pokles pod úroveň okolního) není vyloučena možnost úplného odrazu paprsku na vnitřní části vlny [9].

V plynné fázi se těžko najde přesně definované rozhraní, kde se mění index lomu. Mnohem častěji jde o gradient, tedy postupnou změnu z jednoho na jiný a je těžké definovat přesné rozhraní. Například na následujícím obrázku 3 je vidět, že náhlá změna tlaku (tedy i indexu lomu) je pouze na začátku vlny a potom při sekundární rázové vlně (tam, kde se ze záporných hodnot vrací tlak na nulu), zbylý průběh je pozvolný (reálný záznam pořízený tlakovým čidlem ve vzdálenosti 4 m od místa exploze, nálož 800g Semtexu 1A, ÚEnM). V grafu je na ose y zobrazen přetlak vůči okolnímu v kPa a na ose x je čas v milisekundách.



Obrázek 3: Graf tlakového průběhu vzdušné rázové vlny

1.3 Princip techniky schlieren

Schlieren je optická zobrazovací technika, která umožňuje pozorování jevů v běžně průhledných médiích. Zde bude popsán princip, jak vznikají výsledné obrazy z této techniky. Jedná se o zobrazování částí prostoru, kde je jiný index lomu než v okolí.

Lze takovéto změny pozorovat pouhým okem, rozdíly indexů lomu ale musí být relativně velké, například lze vidět vlnění horkého vzduchu nad grilem, ohněm, nebo po otevření dveří auta rozpáleného letním sluncem, věci za těmito objekty se zdají rozostřené [5].

Lidským okem nelze bez úpravy prostředí vidět menší změny. Protože v přirozeném prostředí světelné paprsky do oka dopadají ze všech možných úhlů (v důsledku odražení od objektů které pak vidí). Není schopno se soustředit na jeden směr, odkud paprsky přicházejí a nepozná jestli jich do něj padlo o jeden víc, nebo o tři míň. Z praktického hlediska to je dobře, protože bychom viděli rozmazaně a naše vidění by bylo velmi omezené [15].

Pokud je požadováno pozorovat menší změny indexů lomu, lze to vyřešit kontrolovaným prostředím a několika objekty (čočky, zrcadla apod.), pak je možno i pouhým okem pozorovat rozdíly teplot pouze několik kelvinů [5].

Možností uspořádání kontrolovaného prostředí (aparatur) je více a budou probrány později v části začínající na straně 19. Zde bude vysvětleno, jak se v nich vytváří obraz testovací oblasti. Světlo ze zdroje (bodového) postupuje prostorem k zrcadlu, od zrcadla se odráží a sbíhá se do jednoho bodu v prostoru, kde je žiletka. Pokud nebude prováděn žádný experiment před

zrcadlem, bude vzduch, kterým světlo prochází homogenní, tedy bude mít všude stejný index lomu. Všechny paprsky budou směřovat do toho bodu, který hrana z poloviny blokuje.

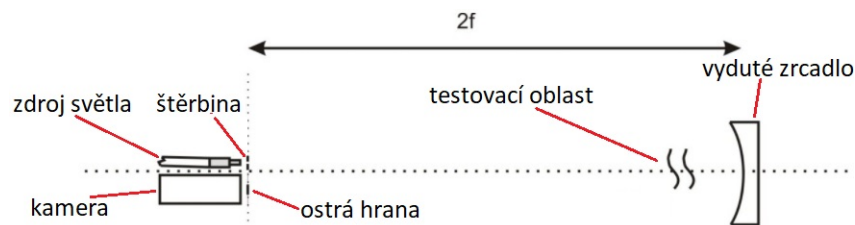
Část záření projde nad hranou a část bude zblokována. To udělá projekci polotmavého kruhu. Pokud však bude narušena homogenita prostředí, stane se následující: paprsky, které narazí na prostředí s jiným indexem lomu se odkloní. Odrazí se od zrcadla jinak než zbytek, tedy paprsky které by předtím dopadly tak, že by je zblokovala žiletka tak se ohnuly a proletěly nad ní. Podobně paprsky, které by původně prošly, se mohly odklonit do hrany žiletky a být zblokovány. Toto ve výsledku tvoří světlejší a tmavší místa na finální projekci na místech, kde došlo k vychýlení paprsků. Jinými slovy tvoří se obraz toho, kde je v prostoru před zrcadlem jiný index lomu. Když bude posouváno žiletkou tak, že zakryje třeba tři čtvrtiny světla, bude obraz citlivější, takže bude možnost pozorovat i teplo stoupající z ruky před zrcadlem. Protože je ale blokováno hodně světla, celkový obraz bude tmavší a mnohem náchylnější na otřesy, či jiné zásahy do integrity sestavy.

1.4 Možnosti uspořádání sestav

Způsobů, jakými postavit vlastní aparaturu, je mnoho. Často obsahují vydutá zrcadla, ale není to podmínkou, mohou být postaveny třeba s čočkami. Jsou sestavy, kde je výsledek sledován optickým zařízením (kamerou, foťákem), nebo kde je promítán na plátno, nebo zeď.

1.4.1 Jednozrcadlová sestava

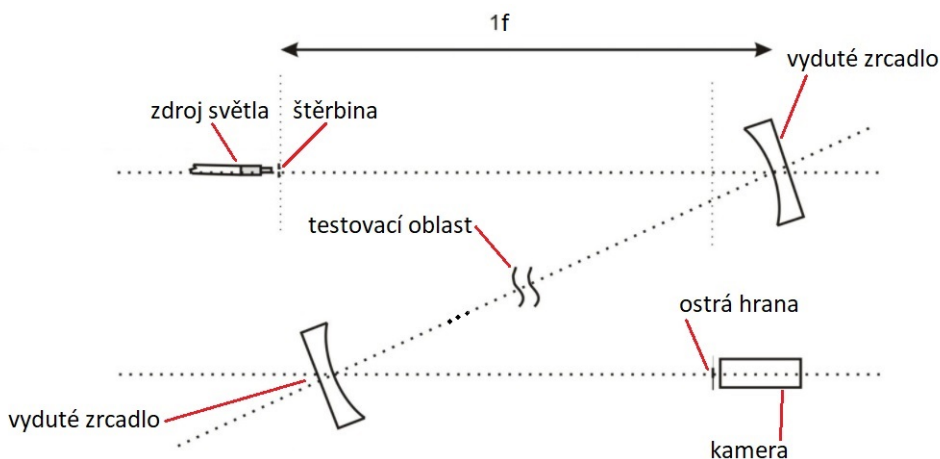
Pro jednozrcadlové uspořádání je třeba: bodový zdroj světla, vyduté zrcadlo, ostrá hrana (ideálně žiletka nebo čepel odlamovacího nože), optické zařízení (kameru, foťák) a pozorovaný objekt (například svíčka nebo hrnek s horkým čajem). Uspořádání aparatury viz obrázek 4 [5].



Obrázek 4: Schéma jednozrcadlové soustavy [16]

1.4.2 Dvouzrcadlová sestava

Dvouzrcadlové sestavy jsou složitější na postavení a na zkalibrování. Jsou širší, ale kratší než jednozrcadlové. Mají výhodu v tom, že prostor pro pozorování se nachází uprostřed mezi zrcadly, je širší než u jednozrcadlového a hlavně dál od plochy vlastních zrcadel. To je chrání. Pro dvouzrcadlové uspořádání je potřeba to samé co na jednozrcadlové plus další stejné zrcadlo a větší prostor.



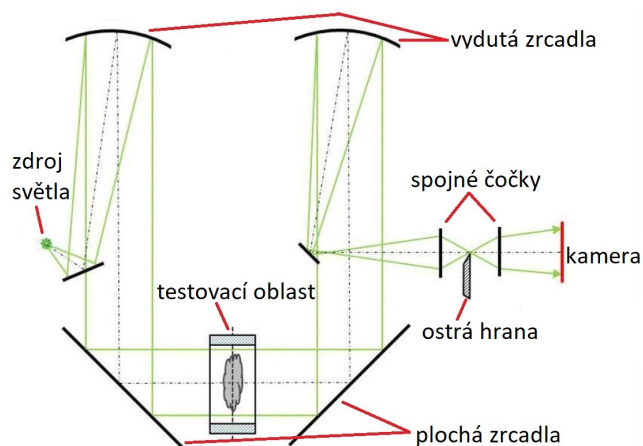
Obrázek 5: Schéma Z uspořádání [16]

Běžná dvouzrcadlová sestava je takzvané Z uspořádání, kde se paprsky odrazí ještě jednou než dopadnou na ostrou hranu. Tedy půjdou ze zdroje světla na jedno zrcadlo, z něj na druhé a teprv z něj na hranu a do kamery (jejich dráha přibližně opíše písmeno Z, viz obrázek 5)[17].

Pro ještě větší ochranu vydutých zrcadel se může postavit jiná dvouzrcadlová sestava, která zabere více místa, ale zminimalizuje riziko poškození drahých vydutých zrcadel. Na ni jby byly potřeba kromě věcí z předchozího uspořádání ještě dvě obyčejná plochá zrcadla. [18]

Úprava by byla provedena tak, že paprsky jdoucí z prvního vydutého zrcadla by byly odraženy pod úhlem 90° (dopadnou na ploché zrcadlo pod úhlem 45°). Pak se stejným způsobem vrátí zpět do druhého vydutého zrcadla (viz obrázek 6) a budou pokračovat do kamery.

Tomuto tvaru se říká „U“, nebo „přeložené Z“ uspořádání [18]. Na obrázku je ještě znázorněn odraz světla přímo ze zdroje, než dopadne na první vyduté zrcadlo a podobně po odrazu ze druhého. To není nutné, pokud je k dispozici dostatečně velký prostor a možnost manipulovat se zrcadly v soustavě. Je možné nechat zdroj svítit přímo a druhé vyduté zrcadlo natočit tak,

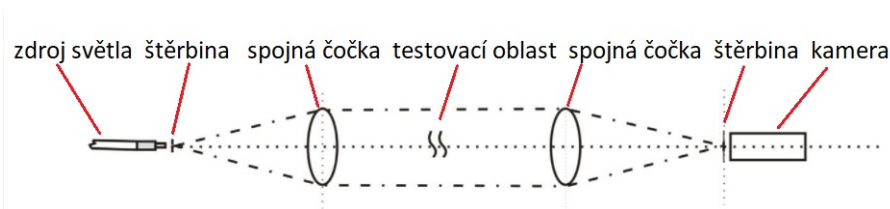


Obrázek 6: Schéma U uspořádání [18]

aby světlo z něj nemuselo být přeměrováno. Testovací oblast se nachází mezi dvěma plochými zrcadly.

1.4.3 Sestava se spojnými čočkami

Pokud nejsou k dispozici vydutá zrcadla, lze docílit podobného výsledku za použití spojných čoček. Sestava je jednoduchá, v podstatě je vše v jedné řadě. Testovací zóna je mezi čočkami. Vzdálenosti první čočky od zdroje světla a druhé čočky od objektivu musí odpovídat ohniskové vzdálenosti čoček (obrázek 7) [19].

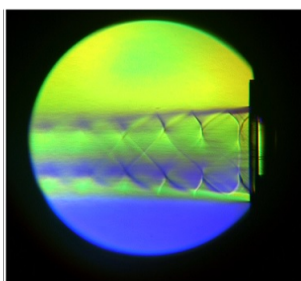


Obrázek 7: Schéma uspořádání s čočkami [16]

1.4.4 Možné modifikace sestav

Možnou úpravou je promítání v reálném čase místo nahrávání na foťák nebo kameru a pozdější pouštění záznamu. Promítat lze dvěma způsoby. Buď přímo na bílou plochu (papír, stěnu, plátno) tak, že na konec sestavy místo kamery bude vložena čočka, která obraz rozšíří a do ohniskové vzdálenosti za ní pak umístěna promítací plocha. Takovéto promítání bude však vertikálně otočené o 180°. Nebo přenosem přes kabel z foťáku, nebo kamery na monitor počítače, kde bude děj lépe vidět a bude správně otočený [5].

Kromě kombinování prvků ze zmíněných možností sestav, je možnost například nahrazení ostré hrany spojením různě barevných fólií, a to buď vodorovně, nebo svisle. Jeden přechod se dvěma různými barvami, nebo do čtverce čtyři kousky různobarevných fólií. Podle toho, kterou částí paprsky projdou, takovou budou mít barvu. Fólie však část světla pohltí, proto je nutno použít silnější zdroj světla [5]. Snímek z barevné modifikace metody ukazuje obrázek 8.

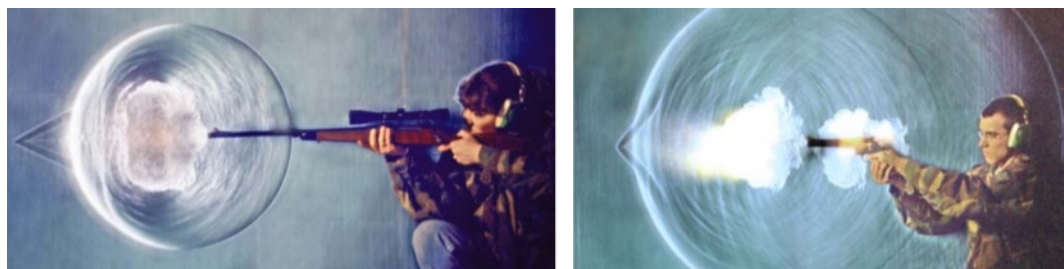


Obrázek 8: Výsledný obrázek ze sestavy s barevným filtrem [20]

1.5 Schlieren orientovaný na pozadí

BOS, nebo schlieren orientovaný na pozadí je termín pro experiment prováděný bez potřeby zrcadla. Obraz je soustředěn (orientován) na pozadí za studovaným objektem. Toto pozadí může být odrazivé (fólie či plechová stěna) nebo přirozené (bez žádné přidané stěny, nebo plochy za pozorovaný objekt) [21].

Pokud je použito odrazivé pozadí, jedná se o tzv. *FSS* (full scale schlieren) nebo *lens and grid type*. Touto technikou je možno zaznamenat testovací oblast třeba 2*3m. To umožňuje pozorování jevů jako jsou, horký vzduch stoupající z grilu či ústředního topení, nebo výstřel z pušky (obrázek 9). Protože sestava zabírá velký prostor a odrazivé pozadí je ploché, není až tak důležité aby zdroj světla byl bodový, ale aby byl silný [22].



Obrázek 9: Obrázky šíření vzdušných rázových vln po výstřelu [22]

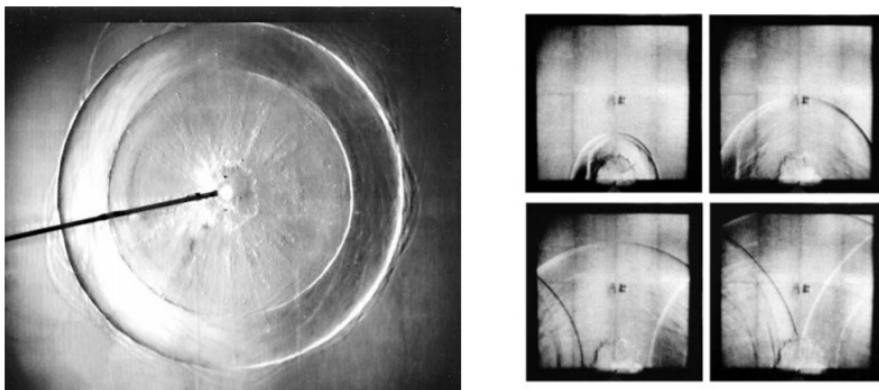
Pokud není k dispozici odrazivé pozadí, je třeba výsledný záznam upravit v počítači softwaru, které zvýrazní místa s jiným indexem lomu. Daný software musí být schopný „odečítat“ předchozí snímek od následujícího. Program si snímek rozdělí na „okna“ o definovaných rozměrech. Zadáváním počtem pixelů vygenerovaných pro každý pixel tak, aby ta původní pozice byla uprostřed a v těch porovnává, jestli se oproti předchozímu snímku někam posunuly pixely. Posunutí jednotlivých pixelů by ale mohlo být zavádějící, takže se zkoumají skupiny pixelů (třeba čtverec $8 * 8$ v okně $16 * 16$) [23].

Pro lepší znázornění bude uvedena situace: na přesných souřadnicích není identická skupina pixelů → program hledá v okně nejbližší skupinu s původním/nejbližším složením → přiřadí vektor posunutí pozice → řeší další skupinu. Na konci tohoto procesu podle konkrétního nastavení uživatele přiřadí vektorům určitou barvu a vygeneruje obrázek posunutí (jenom barvy vektorů) nebo překryje původní snímek a vloží tak barvy přímo do snímku. Jednotlivé snímky pak spojí do výsledného videa [23]. Podrobný postup zpracování je uveden v příloze A od strany 38.

1.6 Aplikace v oboru energetických materiálů

Technikou schlieren je možno pozorovat zmíněné věci jako stoupání horkého vzduchu, nebo ohýbání proudu vzduchu okolo objektů (studie geometrie křídel a jiných aerodynamických tvarů). Pro obor energetických materiálů je však důležitější zaměření na studium rázových vln, jejich pohybu, odražení od překážek, případné spojování více vln, nebo pozvolné utlumení. Ze záznamů, kde je známo měřítko experimentu (například přiložené pravítko), je možno vypočítat rychlost vzdušné rázové vlny, a následně tlak.

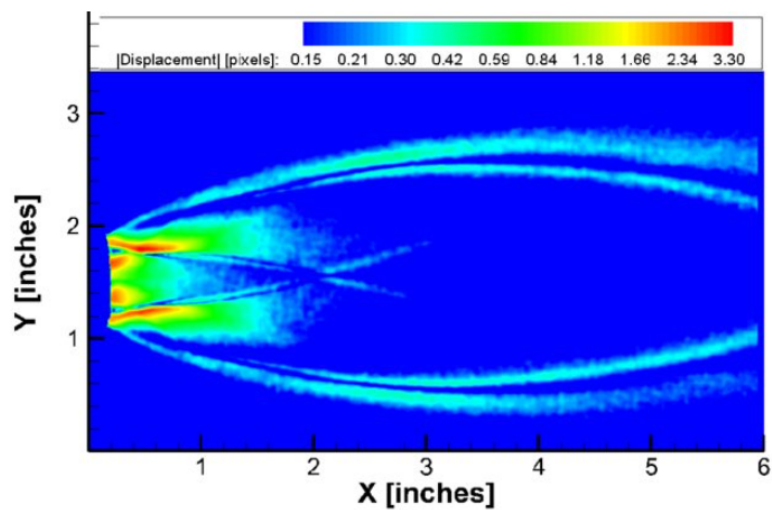
Z konkrétních příkladů byly kromě prostého šíření VRV (obrázek 10)[24][25] zobrazovány třeba exploze v trupu letadla pro studium prostupu vlny a destruktivních účinků při teroristickém útoku (obrázek 11)[26][27], rázové vlny při výstřelu ze střelných zbraní (obrázek 9)[22], správný tok spalin z trysky raketového motoru 12 [28], nebo tvary explozí různých třaskavin v rozbuškách [29].



Obrázek 10: Obrázky šíření a spojování vzdušných rázových vln [24][25]



Obrázek 11: Obrázky šíření rázových vln v trupu letadla [26][27]



Obrázek 12: Obrázek spalin proudících z raketové trysky [28]

2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

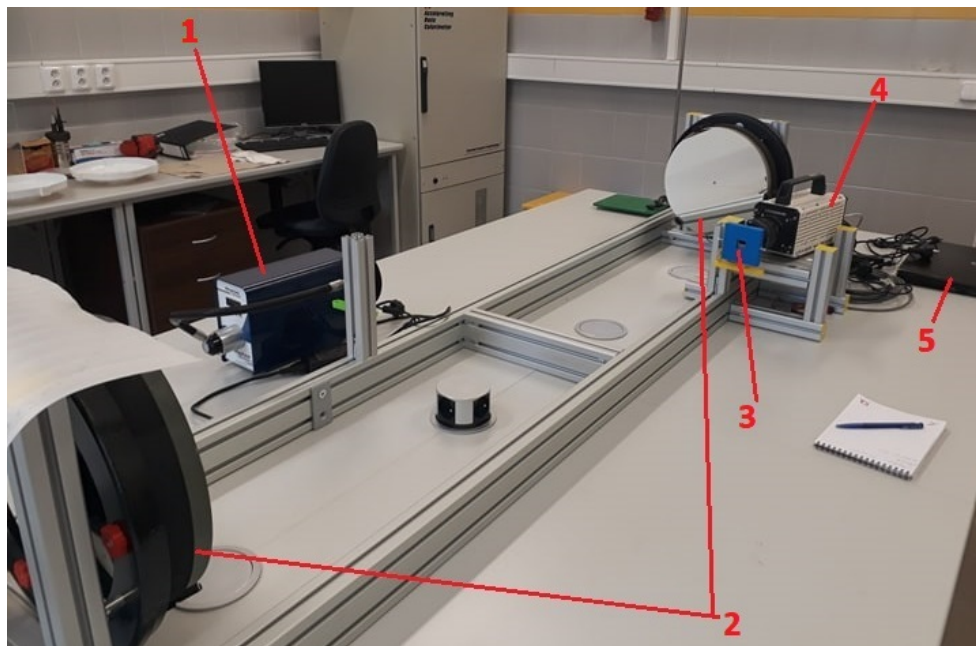
Kromě teoretické řešení bylo provedeno i několik experimentů. V experimentální části budou popsány konkrétní sestavy použité pro tyto experimenty, postupy provedených experimentů a způsob zpracování výsledků.

2.1 Popis měření

Tato část popisuje konkrétní uspořádání měřících sestav použitých při experimentech. Experimenty byly prováděny na dvou místech, menší na aparatuře postavené na ÚEnM. Experiment, který byl zpracován BOS metodou byl proveden ve venkovním střeleckém areálu.

2.1.1 Sestava na ÚEnM

Sestava, která se nachází na Ústavu energetických materiálů, je „Z“ uspořádání. Je postavena na konstrukci z hliníkových hranolů tak, že je možné jednotlivé součásti posunovat a tak ji upravovat.



Obrázek 13: Fotka sestavy na ÚEnM

Na obrázku 13 je vyfocena sestava na ÚEnM. Čísly jsou popsány jednotlivé části sestavy, číslo 1 je světelný zdroj METAPHASER MP-LE1007 [30] s nastavitelnou intenzitou světla a

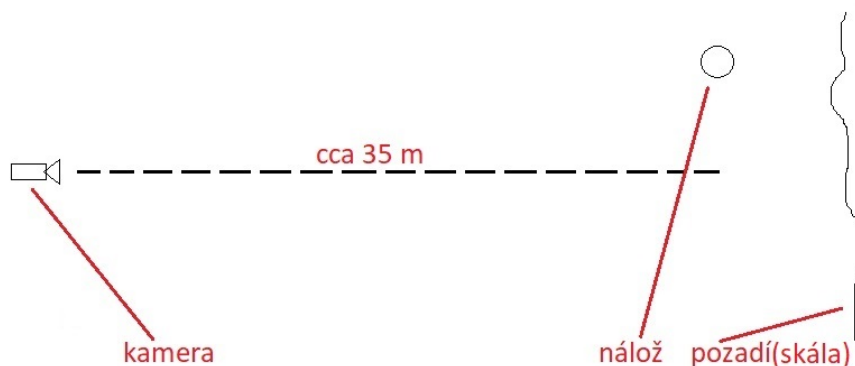
husím krkem Fiberlite pro lepší namíření. Číslem 2 jsou označena vydutá zrcadla od firmy TS optics, průměr 300 mm, ohnisková vzdálenost 120 cm [31]. V sestavě jsou od sebe vzdáleny 170 cm, což dává velký prostor pro testovací oblast a drží ji relativně daleko od plochy zrcadel. Číslo 3 označuje ostrou hranu, konkrétně krabičku se čtyřmi žiletkami orientovanými zespod, shora a z obou stran. Byla vytištěna na 3D tiskárně a pozice žiletek je nastavitelná. Číslo 4 označuje rychloběžnou kameru MEMRECAM GX-3 [32] s objektivem AE-85 mm od firmy SAMYANG. Číslo 5 ukazuje na počítač připojený ke kameře pro řízení nahrávání, nebo pro živý záznam. Na dalším obrázku jsou detaily krabičky žiletek s kamerou a štěrby u zdroje světla 14.



Obrázek 14: Detail štěrby u zdroje světla a žiletkové krabičky u kamery

2.1.2 Sestava pro experiment BOS

Pro experiment BOS je potřeba pouze vysokorychlostní kamera. Zde je schéma provedení experimentu na obrázku 15. Použitá kamera byla rychloběžná kamera značky *Photron* typ *Fastcam mini AX* [33].



Obrázek 15: Schéma experimentu pro BOS

Experiment byl primárně proveden pro měření tlaku rázové vlny. Rozhodnutí o použití videozáznamu pro zpracování technikou BOS bylo později. To také poukazuje na možnou výhodu této techniky v tom, že zvýraznění rázových vln a jiných jevů může být uděláno zpětně z jakéhokoli videozáznamu (pokud je dostatečně kvalitní).

2.2 Popis experimentu

V následujících kapitolách bude popsáno, jaké experimenty byly provedeny na uvedených sestavách, a jakým způsobem. Jedná se o tři experimenty v laboratoři na ÚEnM a jeden, který byl zpracován metodou BOS.

2.2.1 Zahoření propan-butanu vypuštěného ze zapalovače

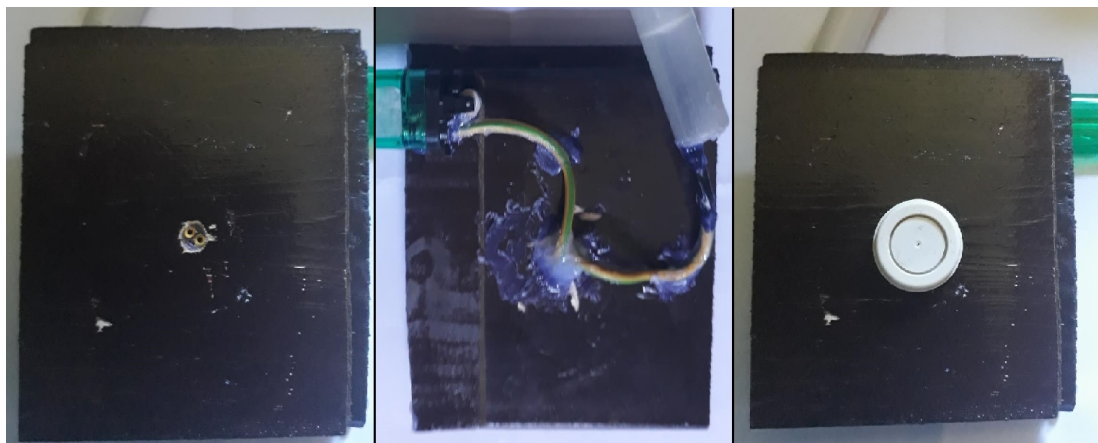
Pozorování zapálení zapalovače. Tento experiment je velmi jednoduchý. Byl použit zapalovač s elektrickou jiskrou (může však být použit i křesadlový). Zapalovač, držen v testovací oblasti, byl zažehnut společně s puštěním nahrávání kamery. Experiment byl několikrát opakován, jeho cílem bylo správně zaostřit sestavu pro další pokusy.

2.2.2 Zahoření propan-butanové bubliny

Pozorování deflagrace bubliny naplněné propan-butanem a vzduchem. Byla snaha bublinu vytvořit tak, aby pouze neshořela, ale aby v ní byla vytvořena výbušná koncentrace se vzduchem (1,5 % – 11 % nalezené na bezpečnostním listu [34]). Pokud by toho bylo úspěšně dosaženo, měla by vzniknout rázová vlna, kterou je žádoucí zachytit.

Doprostřed dřevěné destičky (asi 12 * 12 cm) byla vyvrtána díra o průměru 8 mm, do té byly zavedeny dvě gumové hadičky (bužírky stažené z měděného drátu) o vnějším průměru 3 mm a vnitřním 1 mm. Prostor díry kolem nich byl utěsněn. Cokoliv vystupovalo nad úroveň destičky bylo seříznuto do roviny. Poté byla z klasického zapalovače (s kolečkovým škrtátkem) odstraněna plechová ochrana výpustného ventilu. Na obnažený ventil byla přilepena a utěsněna jedna z hadiček (tak aby se s páčkou na otvírání ventilu dalo stále manipulovat). Následně byl zapalovač přilepen zespod k samotné destičce. Druhá hadička byla nasazena na ústí 10 ml injekční stříkačky, utěsněna a i se stříkačkou připevněna zespod k destičce. Pak byl vzat plastový uzávěr nádoby na léky, do nějž byla vyvrtána díra o průměru 0,8 mm a tento byl pak přilepen nad ústí obou hadiček na horní části destičky tak, aby jak plyn ze zapalovače tak vzduch ze

stříkačky mohl unikat pouze tou provrtanou dírkou (obrázek 16). Víčko bylo potřeno jarovou vodou, aby se při průchodu plynu tvořily bubliny.



Obrázek 16: Fotky vyrobeného generátoru bublin. Nalevo pohled shora na ústí hadiček. Uprostřed pohled zespodu na umístění zapalovače a injekční stříkačky. Vpravo pohled shora na provrtané víčko

Na vyrobeném generátoru bublin bylo zjištěno následující. Největší bublina, jakou je možno nafouknout má v průměru 3 cm, což odpovídá vyfouknutí všech 10 ml vzduchu ze stříkačky, pokud je výbušná koncentrace 1,5 % – 11 %, jak už bylo zmíněno dříve. Znamená to, že na 10 ml vzduchu musí být 0,15 – 1,1 ml propan-butanu. Bylo rozhodnuto pracovat s 0,6 ml. Bylo tedy nafouknuto několik bublin, které byly zapáleny a natočeny.

2.2.3 Exploze acetylidu stříbrného

Na tento experiment byla k dispozici zapůjčená kamera MEMRECAM ACS-1 [35], která je schopná natáčet větší množství snímků za sekundu než ta předchozí. Tím byla zvýšená šance natočení a dobrého zobrazení rázové vlny způsobené explozí. Na laboratorní stojan v testovací oblasti aparatury byl připevněn kruh, na něj položený papír s 48 mg acetylidu stříbrného (Ag_2C_2). Iniciale proběhla zapálenou špejlí.

2.2.4 Experiment pro BOS

Pro tento experiment byla použita výbušnina z litého TNT. Kulová nálož složená ze dvou polokoulí umístěná metr nad zemí vážila 30 kg a byla vzdálena asi 35 m od kamery. Spoušť kamery byla zajištěna zkratovacím čidlem.

2.3 Popis vyhodnocení

V dalších kapitolách je popsáno, jak byly vyhodnocovány experimenty provedené na zmíněných sestavách. Tedy experimenty provedené v laboratoři na aparatuře pro schlieren zobrazování a experiment, který byl vybrán pro zpracování metodou BOS.

2.3.1 Experimenty v laboratoři

Experimenty v laboratoři měly určit, jestli je přítomná sestava schopná dobře vizualizovat jevy v ní pozorované. Vyhodnocení tedy probíhalo pouze vizuální kontrolou ostrosti a světlosti obrazu. Kritéria úspěšného experimentu byla proto stanovena pouze subjektivně.

2.3.2 Experiment BOS

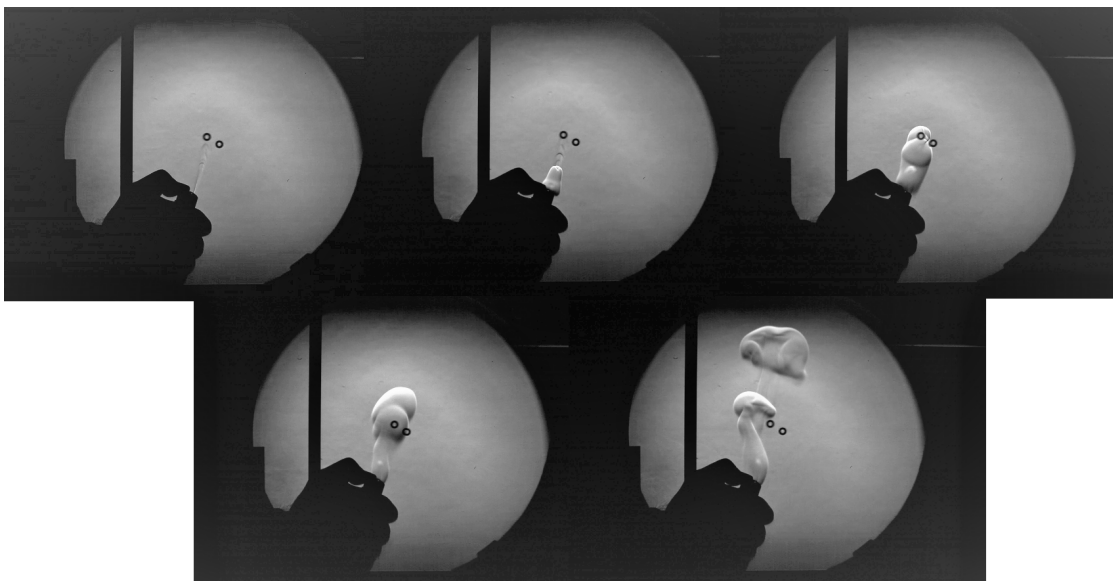
Cílem experimentu bylo zviditelnění pohybu rázové vlny z dostupného videozáznamu. Pro vyhodnocení experimentu bylo třeba zpracovat dané video přes několik softwarů v počítači. Jejich funkce postupně je: rozdělit video na jednotlivé snímky, porovnat a odečíst od sebe snímky, barevně vyznačit posunutá místa a složit je zpět do videa. Podrobný postup zpracování je uveden v příloze A od strany 38.

3. VÝSLEDKY A DISKUZE

V části výsledků jsou shrnuty dosažené výsledky experimentů. Je též diskutováno, čeho bylo dosaženo, co dané výsledky znamenají, nebo jestli mají dále perspektivní aplikace. Vesměs byly výsledky experimentů pozitivní, nenastal žádný významný problém.

3.1 Škrtnutí zapalovačem

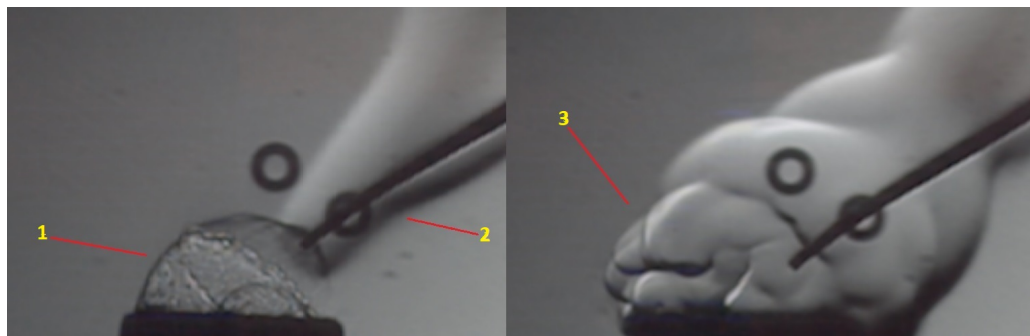
Při opakovaném pozorování propan-butanu vypuštěného ze zapalovače a jeho zahoření se podařilo nastavit sestavu tak, aby poskytovala ostrý a dobře osvětlený obraz. Zde je několik snímků z už zaostřené a nastavené sestavy (obrázek 17).



Obrázek 17: Několik snímků škrtnutí zapalovačem, záznam ze sestavy na ÚEnM

3.2 Zahoření propan-butanové bubliny

Při kombinovaném vpouštění vzduchu a propan-butanu se nikdy nepodařilo dosáhnout výbušné koncentrace. Vždy došlo jen k zahoření. Podle záznamů z rychloběžné kamery se obsah bubliny po prasknutí ještě chvíli směšoval s okolním vzduchem než začal hořet. Což znamenalo, že i při sebemenším přidání propan-butanu ho vždy bylo přidáno moc. Byl tedy nad výbušnou koncentrací směsi.

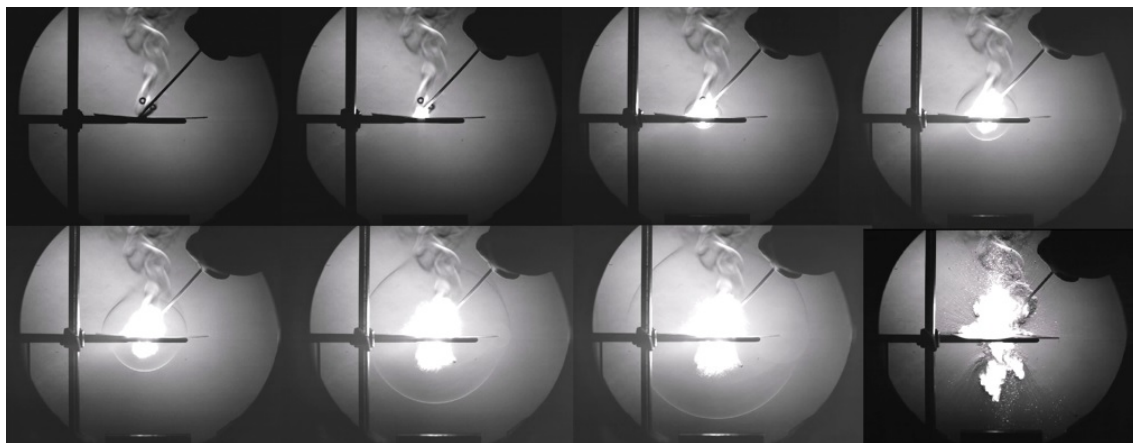


Obrázek 18: Prasknutí a zahoření PB bubliny

Na obrázku 18 číslo 1 ukazuje na právě praskající bublinu, číslo 2 na hořící špejli, která ji propíchlá a číslo 3 je hořící propan-butan ve směsi se vzduchem. Nepodařilo se docílit vytvoření výbušné směsi, tedy nemohla být zaznamenána rázová vlna. Nicméně byly úspěšně natočeny rychloběžné záznamy zahoření propan-butanové bubliny.

3.3 Výsledek exploze acetylidu stříbrného

Byla zřetelně zaznamenána rázová vlna, dokonce lze i vidět, že pod papírem se pohybuje zpožděně, protože jej nejdříve musela protrhnout. Z přibližné uražené vzdálenosti mezi snímky a z času mezi jednotlivými snímky lze odhadnout rychlost rázové vlny.



Obrázek 19: Exploze acetylidu atříbrného

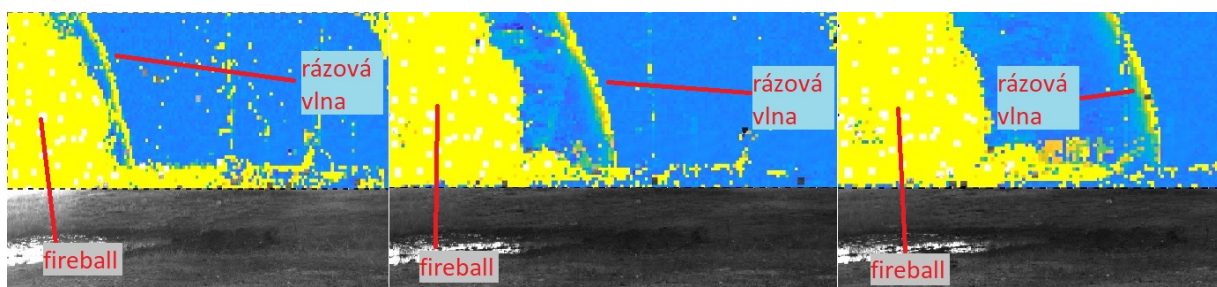
Zde je na ukázkou několik snímků z experimentu poskládaných za sebe (obrázek 19). Nejsou přímo na sebe navazující, aby byl vidět celý průběh exploze.

3.4 Výsledek experimentu BOS

Na obrázku 20 bylo spojeno za sebe několik snímků z původního videa po zpracování metodou uvedenou v příloze A na straně 38. Na uvedených snímcích není takřka vůbec vidět rázová vlna. Po zpracování videa a spojení stejných tří snímků jako v 20 byl vytvořen obrázek 21 kde je rázová vlna zviditelněna.



Obrázek 20: Snímky z původního videa pro porovnání



Obrázek 21: Několik snímků výsledného videa

Modré pozadí je oblast, kde se při odečítání snímků nepohnuly pixely a žlutá barva je zřetelný posun. Je vidět, že žlutá barva zobrazuje postupující rázovou vlnu a samotný fireball. Technika to není dokonalá, takže je vidět na mnoha místech žluté pixely, které tam vytvářejí šum. Nicméně, je to lepší, než pozorovat původní záznam bez jakéhokoli zvýraznění. Technika nebyla provedena v celém rozsahu snímků, protože část záznamu byla jen neměnná zem. Technika byla aplikována pouze na "zajímavou oblast", proto, je spodní část obrázku 21 černobílá a nezměněná od původního.

ZÁVĚR

Byla provedena literární rešerše na téma vizualizace pomocí šlírové (schlieren) techniky. Bylo připomenuto několik principů optiky lomu světla a indexu lomu jako vlastnosti materiálu. Byl rozebrán princip techniky, možná uspořádání pozorovacích aparatur včetně techniky schlierenu orientovaného na pozadí a možnosti aplikace pro studium dějů souvisejících s energetickými materiály.

V experimentální části byla popsána sestava nacházející se na ÚEnM a několik provedených pokusů. Provedené pokusy sestávaly z pozorování zahoření propan-butanového zapalovače, vytvoření a zapálení bubliny obsahující směs propan-butanu se vzduchem a exploze acetylidu stříbrného. Také byla popsáno uspořádání a provedení experimentu, který byl zpracován metodou schlierenu orientovaného na pozadí.

Ve výsledkové části byly diskutovány provedené experimenty a jejich vyhodnocení. Bylo zjištěno, že aparatura dostupná na ÚEnM je schopná velmi dobrého zobrazení homogenních plyných médií s různými indexy lomu. Bylo zřetelně pozorováno škrtnutí zapalovačem, zahoření bubliny se směsí propan-butanu se vzduchem, i rázová vlna způsobená explozí acetylidu stříbrného. Zpracováním experimentu schlierenu orientovaného na pozadí byl výrazně zviditelněn pohyb rázové vlny.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] R. Hooke, *Micrographia*, Library, University of Wisconsin-Madison, URL <https://search.library.wisc.edu/digital/AUWPVW7HX7PXA8P/pages/A4B5C5KXE6535I8T>, [online][cit. 2021-4-18], **1667**.
- [2] J.P.Marat, *Recherches physiques sur le feu*, URL https://play.google.com/store/books/details?id=dS3W1pON_M8C&rdid=book-dS3W1pON_M8C&rdot=1, [online][cit. 2021-5-29], **1780**.
- [3] L. Foucault, Mémoire sur la construction des télescopes en verre argenté, V *Annales de l'observatoire de Paris*, svazek 5, str. 197–237, **1859**.
- [4] H. Draper, On the construction of a silvered glass telescope, *Wash*, **1864**.
- [5] G. S. Settles, *Schlieren and shadowgraph techniques- Visualizing phenomena in transparent media*, Berlin, Germany: Springer-Verlag GmbH, **2001**.
- [6] O. Lepil, *Fyzika pro gymnázia, optika*, Prometheus, spol. s.r.o., [učebnice], **2015**.
- [7] P. Vlček, *Světlo kolem nás*, Disertační práce, Technická Univerzita v Liberci, **2007**.
- [8] P. Matějka M. Dendisová, P. Žvátora, Ramanova spektrometrie, *Úvod-princip Ramanovy spetrometrie*, **1930**.
- [9] J. Zajíc, Fyzika II, URL https://fcht.upce.cz/sites/default/files/public/luva3059/f2_13.pdf, [skripta][cit. 2021-3-18], **2013**.
- [10] P. Smilek, Sbíрка příkladů z atomové a jaderné fyziky, URL <https://theses.cz/id/84710b/00171727-348818799.pdf>, [bakalářská práce] Univerzita Palackého v Olomouci [cit. 2021-5-9], **2013**.
- [11] B. Binici S. Lavergne M. Winsper D. Golovaty L. Gross J. A. Pojman, V. Viner, Snell's law of refraction observed in thermal frontal polymerization, *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, **17**(3), str. 033125, **2007**.
- [12] PhysLink, Absolute Indices of Refraction List, Index of Refraction of Various Materials, URL <https://www.physlink.com/reference/indicesofrefraction.cfm>, [cit. 2021-4-6].

- [13] E. Ragozzino F. Somma G. Abbate, U. Bernini, The temperature dependence of the refractive index of water, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **11**(8), str. 1167, **1978**.
- [14] E. Dluhoš A. Darebníček, J. Chaloupka, Rázová vlna, URL <https://www.mosr.sk/data/files/1258.pdf>, [online] Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT [cit. 2021-4-17].
- [15] S. K. Nayar K. Nishino, The world in an eye [eye image interpretation], V *Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2004.*, svazek 1, IEEE, **2004**.
- [16] CAVITAR, Schlieren Imaging, URL <https://www.cavitar.com/library/schlieren-imaging/>, [online][cit. 2021-5-18], **2016**.
- [17] L. A. Vasiliev, Schlieren methods, *Israel Program for Scientific Translations*, **1971**.
- [18] D. Lang G. Candler P. Dimotakis E. Luthman, N. Cymbalist, Simulating schlieren and shadowgraph images from LES data, *Experiments in Fluids*, **60**, URL <https://link.springer.com/article/10.1007/s00348-019-2774-6>, článek č. 134, **2019**.
- [19] P. H. Cords Jr., A High Resolution, High Sensitivity Color Schlieren Method, *Optical Engineering*, **6**(3), str. 85 – 88, **1968**.
- [20] Aerodynamic research center University of texas, Zdroj obrázku ze sestavy s barevným filtrem, URL <https://arc.uta.edu/research/schlieren.htm>, [online][cit. 2021-5-6].
- [21] M. Raffel, Background-oriented schlieren (BOS) techniques, *Experiments in Fluids*, **56**, URL <https://link.springer.com/article/10.1007/s00348-015-1927-5>, článek č. 60, **2015**.
- [22] G. S. Settles, The penn state full-scale schlieren system, V *Int. Symp. on Flow Visualization*, Citeseer, **2004**.
- [23] J. Weisberger, How To Take Pictures Like NASA DIY Background Oriented Schlieren, URL http://www.joshtheengineer.com/wp-content/uploads/2019/10/DIY_BOS_JoshTheEngineer_v1.pdf, [online][cit. 2020-12-9], **2019**.
- [24] J. A. Gatto B. W. Anderson G. S. Settles, J. R. Benwood, "Shock waves in aviation security and safety, proc. 23rd Intl. Symposium on Shock Waves, ed. F. K. Lu, Arlington, TX, **2001**.
- [25] J. A. Gatto B. W. Anderson G. S. Settles, J. R. Benwood, Optical shock wave imaging for aviation security, aSME FEDSM Paper 2003-45606, Vol. 1A, str. 113-118, **2003**.

- [26] J. D. Miller G. S. Settles, A. D. Brandt, Full-scale schlieren imaging of shock waves for aviation security research, proc. 8th ISFV, ed. G. Carlomagno, Paper no. 30, **1998**.
- [27] B. W. Anderson J. A. Gatto G. S. Settles, B. T. Keane, Shock waves in aviation security and safety, shock Waves, Vol. 12, No. 4, str. 267-275, **2003**.
- [28] M. P. Wernet, Application of Background Oriented Schlieren for Altitude Testing of Rocket Engines, URL https://www.researchgate.net/publication/320623383_Application_of_Background_Oriented_Schlieren_for_Altitude_Testing_of_Rocket_Engines, [cit. 2021-4-2], **2017**.
- [29] D.B. Gawthrop, Propagation tests and the photography of the disturbance sent out by the explosion of commercial electric detonators, *Journal of the Franklin Institute*, **214**(6), str. 647–664, **1932**.
- [30] Netherlands Vision Light Tech, MetaPhaser LED Light Engine, URL <https://www.visionlighttech.com/product.php?hoofdgroep=lighting&subgroep=fiber-optic-illuminator&id=MP-LE1007-W-24>, [online][cit. 2021-5-6].
- [31] Germany Teleskop Express, TS-Optics 300 mm (12 ") Newtonian primary mirror f / 5 made of quartz glass, URL https://www.teleskop-express.de/shop/product_info.php/info/p7223_TS-Optics-300-mm--12---Newton-Hauptspiegel-f-5-aus-Quarzglas.html, [online][cit. 2021-5-6].
- [32] NAC image technology, specifikace MEMRECAM GX-3, URL https://www.nacinc.com/datasheets/archive/Memrecam_GX-3.pdf, [online][cit. 2021-5-6].
- [33] Photron, Specifikace kamery fastcam mini, URL https://photron.com/wp-content/uploads/2015/11/FASTCAM_MINI-AX200_monitor.pdf, [online] [cit. 2021-5-12].
- [34] Unipetrol, Bezpečnostní list Propan-butan, URL https://www.unipetrolrpa.cz/CS/NabidkaProduktu/rafinerske-produkty/OstatniRafinerskeProdukty/ZkapalneneRopnePlynyLPG/Documents/Propan-butan_CZ_8_1.pdf, [online][cit. 2021-4-3], **2017**.
- [35] NAC image technology, specifikace MEMRECAM ACS-1, URL <https://www.nacinc.com/pdf.php?pdf=/datasheets/Memrecam-ACS-1-Data-Sheet.pdf>, [online][cit. 2021-5-8].

- [36] Inc. The Math Works, MatLab, URL <https://mathworks.com/products/matlab.html>, verze R2020a [Software][cit. 2020-12-9], **2020**.
- [37] E. Frise J. Schindelin, I. Arganda-Carreras, Fiji: an open-source platform for biological-image analysis, *Nature Methods*, **9**, str. 676–682, zdroj je na článku o programu, software je k dostání zde <https://fiji.sc/> [cit. 2020-12-9], **2012**.
- [38] FFmpeg developers, FFmpeg, URL <https://www.ffmpeg.org/>, verze 4.3 [software][cit. 2020-12-9], **2020**.
- [39] J. Weisberger, How To Take Pictures Like NASA using Background Oriented Schlieren (BOS), URL <http://www.joshtheengineer.com/2019/10/20/how-to-take-pictures-like-nasa-using-background-oriented-schlieren-bos/>, [webová stránka][cit. 2020-12-9], **2019**.
- [40] J. Weisberger, BOS ImageJ Macro Update, URL <https://www.youtube.com/watch?v=GXap0tBf52o>, [video návod][cit. 2021-1-29], **2021**.
- [41] J. Weisberger, How To Take Pictures Like NASA: DIY Background Oriented Schlieren, URL <https://www.youtube.com/watch?v=VCUN59x0LF4&t=1688s>, [video návod][cit. 2020-11-18], **2019**.

PŘÍLOHA A

V této příloze bude popsán postup při vyhodnocení experimentu BOS, ilustrován na konkrétním příkladu.

Nejdříve je uveden seznam věcí, které jsou potřeba. Byly použity softwary *MatLab* [36], *Fiji* [37] a *FFmpeg* [38]. Pro *Fiji* plugin (macro), který rozdělí dané video na jednotlivé snímky, pojmenuje je podle toho, jak jdou po sobě a uloží je do vybrané složky. Takto fungoval soubor „BOS Save Sequence.ijm“, který je k nalezení a stažení na [39]. S novou verzí softwaru *Fiji* tento soubor neuměl správně převzít jméno videa a nezvládal uložit více jak 100 snímků. Byl kontaktován autor a daný soubor byl upraven tak, aby správně pojmenovával a mohl ukládat až 10000 snímků. Tato nová verze se jmenuje „BOS Save Sequence v2.ijm“ a je k dispozici na stránkách autora [39]. Konkrétní změnu programu lze najít v aktualizacím videu [40].

Pro *MatLab* jsou též potřeba soubory, které do něj byly vloženy, těmito soubory jsou „GUI BOS v2.m“ a „GUI BOS v2.fig“ (kód je dostupný na stránkách [39] a vysvětlení použití je k dispozici v použité literatuře [23]). Jenže kvůli úpravě kódu pro *Fiji* by v základním, nastavení nefungoval (hledá pouze dvojmístné číslice za názvem snímku podle původního programu). Proto je nutno udělat malou úpravu i v souboru „GUI BOS v2.m“. V podstatě jde jen o to, aby hledal až čtyřmístná čísla místo jen dvoumístných. Změna kódu je ukázána na následujících obrázcích 22 a 23.

```
1035 | % Get raw image file names ready
1036 | fileRaw = cell(v_numFrames,1);
1037 | for m = 1:1:v_numFrames
1038 |     if (m+v_sFrame-1 < 10)
1039 |         fileRaw{m} = ['Raw_0' num2str(m+v_sFrame-1) '.tif'];
1040 |     else
1041 |         fileRaw{m} = ['Raw_' num2str(m+v_sFrame-1) '.tif'];
1042 |     end
```

Obrázek 22: Kód před úpravou

Soubor .fig není potřeba nijak upravovat, stačí jej stáhnout do stejné složky jako soubor .m a je možno začít upravovat video.

Nejdříve je třeba video převést na formát .avi, zde děláno přes *FFmpeg*. To tak, že se otevře příkazový řádek v počítači a do něj nejdříve napíše místo uložení programu *FFmpeg*, jako příklad bude uvedeno uložení na mém počítači. Příkazový řádek začíná na disku C: ve složce users ve složce s názvem přihlášeného účtu, viz obrázek 24.

```

1035 | % Get raw image file names ready
1036 - | fileRaw = cell(v_numFrames,1);
1037 - | for m = 1:1:v_numFrames
1038 - |     if (m+v_sFrame-1 < 10)
1039 - |         fileRaw{m} = ['Raw_000' num2str(m+v_sFrame-1) '.tif'];
1040 - |     elseif (m+v_sFrame-1 < 100)
1041 - |         fileRaw{m} = ['Raw_00' num2str(m+v_sFrame-1) '.tif'];
1042 - |     elseif (m+v_sFrame-1 < 1000)
1043 - |         fileRaw{m} = ['Raw_0' num2str(m+v_sFrame-1) '.tif'];
1044 - |     else
1045 - |         fileRaw{m} = ['Raw_' num2str(m+v_sFrame-1) '.tif'];
1046 - |     end

```

Obrázek 23: Kód po úpravě

```

C:\Users\anony>

```

Obrázek 24: Příkazový řádek 1

Pro to aby se mohlo dostat do složky, ve které je uložený program musí se nejdřív napsat, aby počítač hledal na disku D tím, že se napíše „D:“ viz obrázek 25 a zmáčkne enter.

```

C:\Users\anony>D: _

```

Obrázek 25: Příkazový řádek 2

To změni základní vyhledávání na chtěný disk. Dále je potřeba zadat definici příkazu, který bude použit na zpracování videa. To znamená, že dál se napíše „cd *umístění složky bin ve vašem ffmpegu*“ příklad mého umístění lze vidět na obrázku 26.

Po opětovném zmáčknutí enteru je počítač připraven provést akci skrze ffmpeg. Poslední věc, kterou je třeba napsat je, jaké video (celé umístění), jakou část z něj (počáteční čas a čas od toho počátku, ne konečný) a na jaký formát a jméno (opět celé umístění) je přeformátováno. Opět příklad z mého počítače: bylo vzato osmi sekundové video PhotronR3.mp4 s celým umístěním, bylo napsáno že ho má počítač přeformátovat od začátku 00:00:00 do konce 00:00:08 na video

```
ca. Command Prompt
Microsoft Windows [Version 10.0.18363.1198]
(c) 2019 Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\anony>D:

D:\>cd D:\BORDEL\img_j\ffmpeg\ffmpeg-n4.3.1-20-g8a2acdc6da-win64-gpl-4.3\bin_
```

Obrázek 26: Příkazový řádek 3

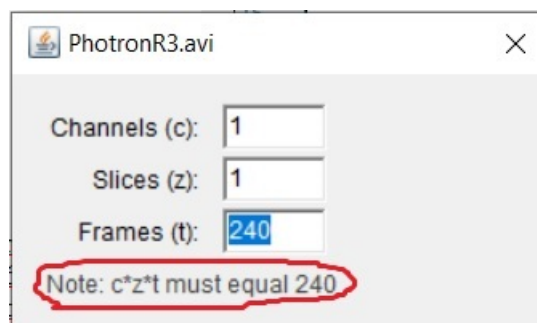
PhotronR3.avi uložené ve stejné složce jako originál. Celý příkaz je zde ve wordu 27 protože byl špatně vidět na obrázku z příkazového řádku.

```
ffmpeg -i D:\BORDEL\img_j\Blastwave\photron\PhotronR3.mp4 -ss 00:00:00 -t 00:00:08 -pix_fmt nv12 -f avi -q:v 0 -vcodec rawvideo D:\BORDEL\img_j\Blastwave\photron\PhotronR3.avi
```

Obrázek 27: Příkazový řádek 4

Teď je video přeformátované a je možno s ním dál pracovat, po otevření aplikace Fiji a přetáhnutím, do ní vložíme video (s koncovkou .avi). Při vkládání souboru vyskočí okno s nastavenými parametry videa, zvolí se kromě výchozího nastavení ještě *konvertovat do černobílé*.

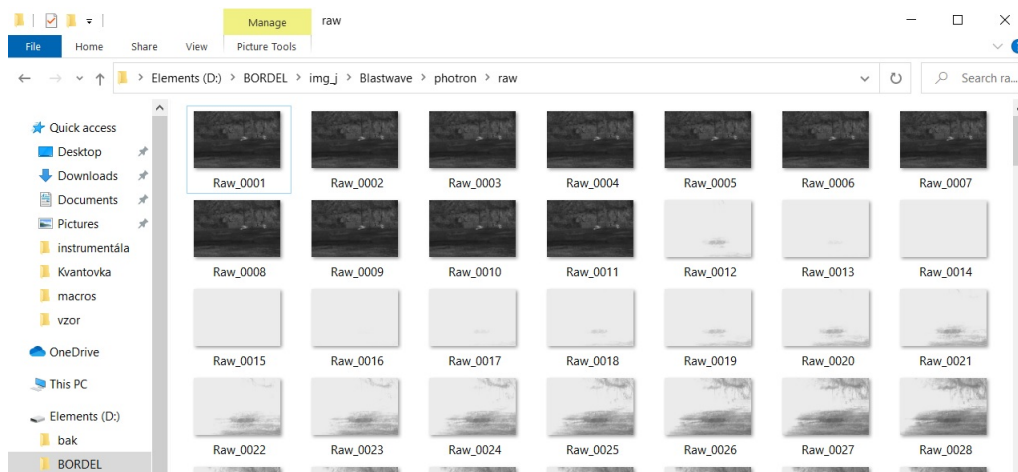
Dál bude otevřena záložka *image* a zvoleno *properties*, tam místo čísla v kolonce *slices* napsat jedničku a to číslo, které tam bylo napsat do *frames* (pod kolonkami je nápověda 28, že součin všech musí být původní smazané číslo, tedy zde $1 * 1 * 240$). Se zbytkem nic nedělat a potvrdit.



Obrázek 28: Nápověda na počet snímků

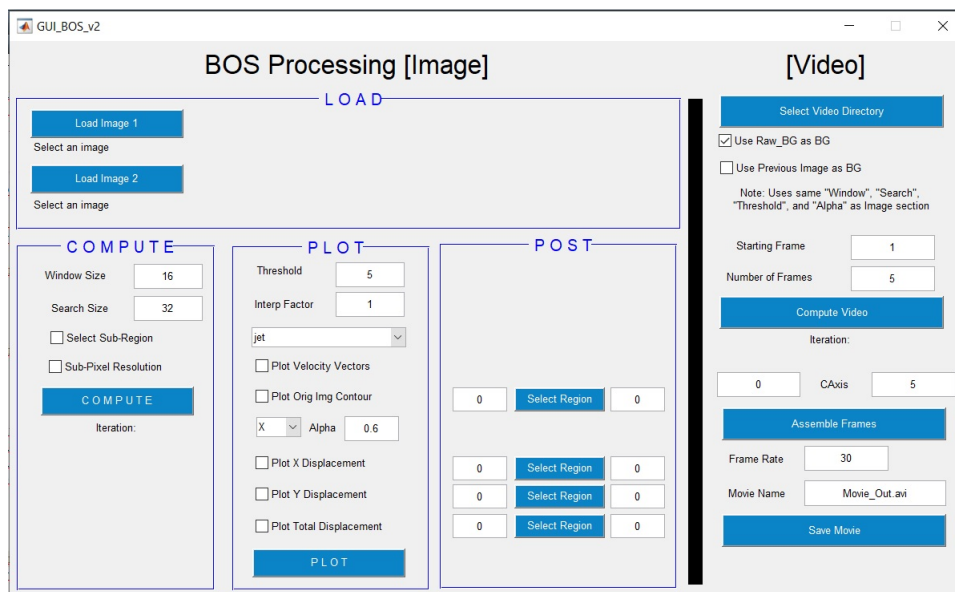
Pak otevřít záložku *plugins*, *macros* a *run* najít a zvolit požadovaný soubor „BOS Save Sequence v2.ijm“ (může se stát, že se uloží do složky *plugins* místo *macros*). Otevře se okno kde se zvolí kam uložit video rozložené na jednotlivé snímky a potom od jakého snímku po jaký a jaké intervaly mezi nimi. Nechat od prvního snímku, napsat do posledního (zde 240) a

po jednom. *Fiji* následně rozloží video na jednotlivé snímky, pojmenuje je a uloží (výsledek viz obrázek 29).



Obrázek 29: Uložené snímky

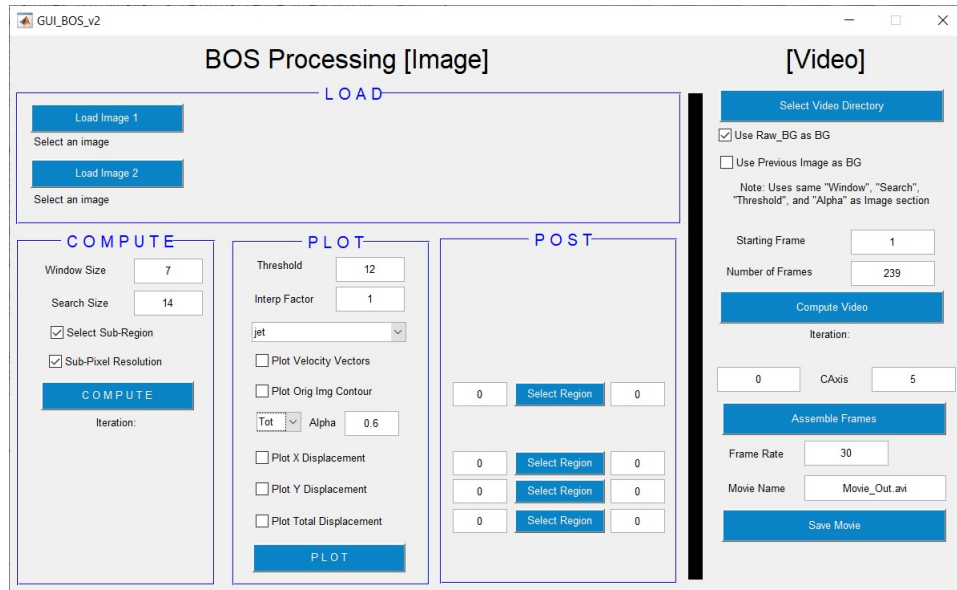
Takto rozložené video je připravené na poslední fázi úpravy. Pro ni je třeba otevřít program *MatLab* a v něm spustit dvojklikem soubor „GUI BOS v2.m“, upravit v něm kód podle obrázků 22 a 23. Pak spustit zeleným trojúhelníkem *run* v horní liště. Otevře se nové okno, které vypadá takto.



Obrázek 30: Okno souboru GUI BOS v2.m

Jak lze vidět, je rozdělené na dvě hlavní části, a to *Image* a *Video* části pro obrázek se teď nevěnovat. Její podrobné vysvětlení je ve videu [41] od času 23 : 40. V ní je jen potřeba zaškrtnout pár věcí. Sekce *Video*. Nejdříve tedy kliknout na *select video directory* a zvolit složku, ve které jsou uloženy jednotlivé snímky (tady složka *raw* podle předchozího obrázku 29). Pak je nutno zvolit, jaký obrázek mít jako pozadí, od kterého se bude další snímek odečítat, pokud je žádoucí, aby se všechny vztahovaly na nějaký původní snímek pozadí (vytvořený zkopírováním snímku 0001 a přejmenováním ho na „Raw BG“ podle obrázku 30), nebo jestli se má každý následující snímek porovnávat s bezprostředně předchozím. Obě možnosti mohou mít svoje využití, doporučuje se udělat dvě videa s oběma možnostma a porovnat pak výsledek, který se bude hodit více. Následně zvolit od jakého snímku a kolik snímků od toho prvního je zapotřebí zpracovat. Zde je chtěno celé video, takže od prvního a počet snímků 239. Dříve než bude zmáčknuto tlačítko *compute video* je nutno zvolit parametry v levé části u *compute* a *plot*. V části *compute* se volí velikost vnitřního a vnějšího okna pro hledání změny vektorů (popsané v části Schlieren orientovaný na pozadí na straně 22). Toto záleží na tom, jak kvalitní je záznam, příliš malé okno bude zobrazovat hodně rušení, příliš velké nenajde, co je potřeba. Použitá nastavení byla 8 a 16, nebo 7 a 14. Dále je možnost zvolit, že má počítač řešit jen část obrázku a ne celý, když není na celém snímku pozorovaná věc, je zbytečné nechat zpracovat i to co není potřeba. Nakonec tam je možnost *sub pixel resolution* to trochu vyhladí finální obraz a zlepší kvalitu. Ještě dvě věci, které jsou doporučeny vyladit před spuštěním jsou kolonka *threshol* v části *plot* to udává jakou škálu změn (jaké velikosti vektorů) zahrne počítač do finálního obrazu, pokud je hodnota malá stane se, že ve finálním obrazu budou prázdné (bílé) fleky, kde to nic nezaregistrovalo, pokud bude hodnota moc velká, slije se vše do jedné barvy a nebude nic moc vidět, tato hodnota se hodí zkoušet pro každé video zvlášť, zde bude použita hodnota 12. A druhá věc je vedle *alpha*, kde je „X“ toto změnit na „Tot“, to znamená, že se na finálním obrazu zpracuje totální (celkový) posun vektorů a ne pouze v ose x. Potom co bude zmáčknuto *compute video* vyskočí okno, pro zvolení oblasti, ve které je požadováno aby program pracoval, vybranou část snímku a dvojklikem potvrdit. Na obrázku 31 je, jak okno vypadá po vyplnění těchto věcí těsně před zmáčknutím *compute video*.

Pak chvíli potrvá, než program projede všechny snímky a uloží je, ještě však video není hotové, jen samotné snímky, takže teď je třeba zmáčknout *assemble frames*. Následně existuje ještě možnost zvolit kolik snímků za sekundu bude video mít a jak se bude jmenovat (nezapomenout při přejmenování tam nechat *.avi*). Výsledné video bude uloženo ve stejné složce, která byla na začátku zvolena.



Obrázek 31: Okno souboru GUI BOS v2.m s vyplněnými údaji