

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
UNIVERZITY PALACKÉHO V OLOMOUCI

KATEDRA EXPERIMENTÁLNÍ FYZIKY



SCHLIEROVÁ METODA ZOBRAZENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vladimír Večeřa

Vedoucí práce

Studijní

obor

Práce

převzata

dne

Poděkování:

Rád bych poděkoval RNDr. Františkovi Petrášovi za vedení diplomové práce, odbornou pomoc při realizaci i zpracování práce, vstřícný přístup i trpělivost.

Dále bych rád poděkoval RNDr. Renatě Holubové CSc. a Mgr Radku Čelechovskému Ph. D. za možnost konzultací a užitečné rady.

V Olomouci Dne _____

Podpis _____

Obsah

1	Seznam použitého značení	1
2	Abstrakt	3
3	Abstrakt	3
4	Vysvětlení termínů a formy odkazů používaných v práci	3
5	Úvod	4
6	Teoretický popis schlierových metod zobrazení	4
6.1	Zhodnocení literatury	4
6.2	Princip měření a zobrazování schlierovými metodami	5
6.2.1	Teoretický popis schlierových objektů a jejich kvantifikace	6
6.2.2	Pozorovatelnost schlierovského objektu a nároky na citlivost sestavy.	8
6.2.3	Šíření různých vlnových délek	9
6.3	Zdroje světla	9
6.3.1	Některé příklady používaných světelných zdrojů	9
6.3.2	Velikost	11
6.3.3	Počet zdrojů	11
6.3.4	Polychromatické zdroje	11
6.4	Činnost prostorového filtru při realizaci schlierových metod zobrazení	11
6.4.1	Citlivost prostorových filtrů (břítu) v sestavě	13
6.4.2	Difrakce při užití prostorového filtru - břítu	14
6.4.3	Jednoduchý prostorový břit a varianty uložení	17
6.4.4	Metody se světlým polem a temným polem	18
6.4.5	Prostorový břit realizovaný štěrbinou, kruhovou, nebo obdélníkovou clonou	19
6.4.6	Prostorové filtry pro barevné metody schlierovského zobrazení a částečnou kvantifikaci	20
6.4.6.1	1d (metody kvantifikace v jedné rovině kolmé k rovině xy)	20
6.4.6.2	2d (metody kvantifikace ve všech rovinách kolmých k rovině xy současně)	21
6.4.6.3	Metody s barevnou maskou světelného zdroje	21
6.4.7	Prostorový břit realizovaný gradientním filtrem	22
6.4.8	Polopropustné, reflexní a částečně reflexní prostorové břity	23
6.4.9	Prostorové filtry metod orientovaných na pozadí	23
6.5	Činnost fázového filtru při realizaci schlierových metod zobrazení	24
6.5.1	Principy vzniku fázového rozdílu v detekční oblasti	25
6.5.2	Citlivost fázového filtru v sestavě	26
6.5.3	Srovnání činnosti prostorového filtru (břítu) a fázového filtru	26
6.5.4	Fázový filtr tvořený diferenciálním (střížným) interferometrem	27
6.5.5	Fázový filtr tvořený Lloydovým zrcadlem	27
6.5.6	Fázový filtr realizovaný Wollastonovými hranoly - obecné poznatky	28
6.5.6.1	Fázový filtr v sestavě se dvěma Wollastonovými hranoly a lineárními polarizátory	29
6.5.6.2	Fázový filtr v sestavě se dvěma polarizátory a jedním Wollastonovým hranolem	30
6.5.6.3	Fázový filtr tvořený dvěma Wollastonovými hranoly v sestavě se třemi Wollastonovými hranoly a dvěma $\lambda/4$ destičkami	31
6.6	Činnost polarizačního filtru při realizaci schlierových metod zobrazení	32
6.7	Detekce	33
6.7.1	Zobrazovací nástroje	33
6.7.1.1	Zobrazení na stínítku	33
6.7.1.2	Pozorování okem	33

6.7.1.3	Záznam analogovou fotografií	33
6.7.1.4	Záznam PIN diodami	33
6.7.1.5	Záznam na CCD čip	34
6.7.2	Záznam na analogové nebo digitální fotografické médium	34
6.8	Základními konstrukce sestav pro schlierové zobrazování	34
6.8.1	Dělení sestav schlierového zobrazení	35
6.8.2	Chod paprsků v detekční oblasti	35
6.8.3	Trasování paprsku a možnosti kvantitativního měření	36
6.8.4	Sestavy prvků využívajících optických čoček pro vytvoření pole v detekční oblasti	38
6.8.4.1	Sestava s jednou spojnou čočkou (Toepler 1854)	38
6.8.4.2	Toeplerova sestava se dvěma objektivy nebo čočkami a homogenními svazky v detekční oblasti	38
6.8.5	Sestavy prvků využívajících zrcadel pro vytvoření pole v detekční oblasti	39
6.8.5.1	Herschellianova sestava (dvouzrcadlová schlierová sestava Z-typ)	39
6.8.5.2	Jednozrcadlová schlierová sestava "of axis"	40
6.8.5.3	Jednozrcadlová schlierová sestava s děličem svazku	40
6.8.5.4	Jednozrcadlová schlierová sestava s reflexním břítem	41
6.8.5.5	Použití kombinace sestavy prvků se zrcadly a diferenciálního břítu s Wollastonovými hranoly na příkladu sestavy Z-typ	41
6.8.6	Sestavy využívající zobrazení se specifickým pozadím schlierovského objektu	42
6.8.6.1	Sestavy využívající difrakčních obrazců jako specifického pozadí	43
6.8.6.2	Sestavy využívající rastrů a jiných kontrastních bodů či ploch jako specifického pozadí	44
6.8.7	Schlierové zobrazení teleskopem a projevy schlierovských objektů při užití teleskopu	44
6.8.8	Mikroskopové metody	45
6.9	Citlivost a vyhodnocení měření	46
6.9.1	Citlivost a kontrast zobrazení	46
6.9.2	Analýza objektu	48
6.10	Využití	48
6.10.1	Mikroskopové metody	48
6.10.2	Rázové vlny při proudění s rychlostí nad 0,5 Mach	49
6.10.3	Proudění, změny tlaku teploty a hustoty	49
6.10.4	Analýza plazmatu	49
6.10.5	Pozorování kinetiky chemických reakcí	49
6.10.6	Využití schlierových technik a principů v mesooptice	50
7	Realizace praktické části a vyhodnocení měření	51
7.1	Výběr sestav	51
7.2	Realizace sestavy s fázovým filtrem	52
7.2.1	Specifika praktického provedení sestavy	52
7.2.1.1	Interference komplementárních koherentních svazků shodné vlnové délky, ze dvou směrů	54
7.2.1.2	Nastavení vhodného úhlu svazků dopadajících na kameru	55
7.2.1.3	Možný přístup ke zpracování výsledků pro použitou sestavu	55
7.2.1.4	Příklad možného přístupu k určení citlivosti a parametřů zobrazení:	57
7.2.1.5	Zdroj lineárně polarizovaného svazku - vedení optickým vláknovým vlnovodem	57
7.2.2	Praktický postup činnosti	58
7.2.2.1	Technická dokumentace - zdroj lineárně polarizovaného svazku světla	58

7.2.2.2	Technická dokumentace - sestava pro schlierové zobrazování	60
7.2.3	Příklad justáže sestavy	66
7.2.4	Provedená měření	67
7.2.4.1	Využití vlnových délek 473 nm a 532 nm při měření	67
7.2.4.2	Pozorování schlierovou metodou zobrazení projevů difrakce na tenkém objektu v detekční oblasti	67
7.2.4.3	Zobrazení projevů zahřátého tělesa v detekční oblasti	68
7.2.4.4	Záznam projevů vlivu chladného tělesa v detekční oblasti	69
7.2.4.5	Záznam projevů vylévání propan-butanu ze skleničky a jeho mísení se vzduchem	70
7.2.4.6	Záznam projevů působení tlaku kleštinami na plexisklo o síle 4 mm	71
7.2.4.7	Záznam projevů stlačování pruhu plexiskla o šířce 3 cm kruhovou svěrací patkou o průměru 1 cm	71
7.2.4.8	Záznam projevů hoření plamene "hořáku" a svíčky v detekční oblasti	72
7.2.4.9	Záznam projevů přenosu tepla mezi plamenem, kovovým objektem a okolním vzduchem	76
7.2.4.10	Záznam projevů tepelného proudění v okolí žárovky a plasmové koule	77
7.2.5	dílčí závěr - vyhodnocení měření na sestavě s fázovým břítem	78
7.3	Realizace měření jednozrcadlovou sestavou s prostorovým břítem	79
7.3.1	Specifika praktického provedení sestavy	79
7.3.2	Příklad možného přístupu k určení citlivosti	79
7.3.3	Praktický postup činnosti	80
7.3.3.1	Technická dokumentace sestavy pro schlierové zobrazení	80
7.3.4	Příklad justáže sestavy	82
7.3.5	Provedená měření	82
7.3.5.1	Pozorování přenosu tepla vedením a zářením pomocí schlierové metody zobrazení	82
7.3.5.2	Pozorování plamene hořáku pomocí schlierové metody zobrazení	82
7.3.5.3	Vliv přípravku pro usměrnění fěnu z vysoušeče vlasů na projevy ve vzduchu pozorované schlierovou metodou zobrazení	84
7.3.5.4	Vedení tepla kovovým objektem a záznam jeho projevů	85
7.3.6	Dílčí závěr - vyhodnocení měření na sestavě se sférickým zrcadlem	86
7.4	Srovnání výsledků	86
8	Didaktické aspekty práce	88
8.1	Didaktické prostředky a úroveň jejich abstrakce	89
8.2	Stanovení metod a forem ve výuce fyziky	89
8.3	Didaktická analýza učiva	91
8.4	Experiment ve výuce fyziky	91
8.4.1	Demonstrační experiment	92
8.4.2	Tvorba vzdělávacích cílů zohledňujících zařazení experimentu	92
8.4.3	Fáze při zařazení experimentu do výuky	93
8.5	Zařazení schlierových zobrazovacích technik do výuky fyziky	94
8.5.1	Témata vhodná pro aplikaci schlierových metod ve výuce fyziky řazená dle stupně vzdělávání	94
8.5.1.1	2. stupeň základního vzdělávání	94
8.5.1.2	Středoškolské vzdělávání	95
8.5.1.3	Vysokoškolské vzdělávání	95
8.5.2	Metodika vybraných úloh s využitím schlierových metod	96
8.5.2.1	Vizualizace odrazu zvukového vlnění ve vzduchu	96
8.5.2.2	Přenos tepla	98

8.5.2.3	Měření namáhání průhledného materiálu	99
8.6	Praktické zařazení experimentu do výuky	100
8.6.1	Přenos tepla zářením a prouděním	100
8.6.1.1	Zařazení experimentu do výuky	100
8.6.1.2	Průběh experimentu a schéma zapojení	102
8.6.1.3	Evaluace experimentu studenty a zhodnocení zařazení ve výuce	103
8.6.2	Zhodnocení zařazení experimentu do výuky	104
8.7	Didaktické zhodnocení práce	104
8.7.1	Přímý didaktický přínos použité aparatury s Wollastonovým hranolem	104
8.7.2	Volba vhodné aparatury pro výuku	105
8.8	Dílčí závěr - didaktické zhodnocení práce a metodika	105
9	Závěr	107
10	Reference	108
11	Seznam obrázků	114
12	Seznam příloh	116
13	Bibliografická identifikace	117
14	Bibliografic identification	117

1 Seznam použitého značení

A		<i>skalární veličina odpovídající komplexní amplitudě elektrické intenzity pole</i>
A_P		<i>skalární veličina odpovídající komplexní amplitudě elektrické intenzity pole ve vyšetřovaném bodě P</i>
A_0		<i>skalární veličina odpovídající komplexní amplitudě elektrické intenzity pole v úrovni překážky</i>
a	(m)	<i>rozměr nezacloněné části obrazu</i>
a_ε	(m)	<i>posunutí obrazu zdroje v rovině fokusu neovlivněných svazků</i>
B	(cd.m ⁻²)	<i>jas emitovaný zdrojem</i>
\mathcal{B}	(m)	<i>detekovaný bod záznamu</i>
b	(m)	<i>šířka zdroje</i>
C		<i>kontrast zobrazení</i>
\mathcal{C}		<i>Tabelované hodnoty Fresnelova integrálu</i>
C_M		<i>Michalsonův kontrast</i>
C_W		<i>Weberův kontrast zobrazení</i>
c	(m.s ⁻¹)	<i>rychlost světla</i>
E	(lx)	<i>intenzita osvětlení pozadí (v záznamu)</i>
E_0	(lx)	<i>intenzita osvětlení detekční oblasti zdrojem</i>
ΔE	(lx)	<i>intenzita osvětlení ovlivněnými svazky (v záznamu)</i>
\vec{E}	(N.C ⁻¹)	<i>vektor elektrické intenzity</i>
e	(C)	<i>náboj elektronu</i>
$\mathcal{E}_{k,i}$	(J)	<i>energie příslušného přechodu kvantových stavů</i>
f	(m)	<i>ohnisková vzdálenost</i>
f_v	(s ⁻¹)	<i>frekvence kolizí volných elektronů s částicemi</i>
H	(m)	<i>Vertikální poloha měřeného bodu vzhledem k optické ose</i>
h	(m)	<i>Rozměr zdroje - výška (největší, vertikální) ve směru osy y</i>
h'	(m)	<i>Rozměr obrazu zdroje - výška (největší, vertikální) ve směru osy y</i>
I	(W.m ⁻²)	<i>intenzita záření</i>
I_r	(W.m ⁻²)	<i>relativní intenzita záření</i>
K	(m ³ .kg ⁻¹)	<i>Gladstone-Dale koeficient (měrná refraktivita)</i>
k	(m ⁻¹)	<i>vlnový vektor</i>
L	(m)	<i>rozměr objektu ve směru šíření svazků (v ose z)</i>
L_1		<i>spojná čočka, nebo objektiv; číslování odpovídá pořadí v sestavě</i>
		<i>Poznámka: obvykle je v práci jako zobrazovací čočka detekční oblasti uváděna L_2</i>
l	(m)	<i>střední vzdálenost objektu od zobrazovací čočky L_2</i>
M	(kg)	<i>hmotnost molekul</i>
\bar{M}	(kg)	<i>průměrná hmotnost roztoku</i>
m		<i>zvětšení</i>
m_e	(kg)	<i>hmotnost elektronu</i>
N	(m ⁻³)	<i>koncentrace volných elektronů</i>
N_i	(m ⁻³)	<i>koncentrace iontů, atomů a molekul</i>
n		<i>index lomu</i>
n_0		<i>index lomu okolí</i>
n_λ		<i>index lomu pro danou vlnovou délku</i>
$P(x, y, z)$		<i>vyšetřovaný bod</i>
p	(Pa)	<i>tlak plynné směsi</i>
p_1, p_2	(Pa)	<i>parciální tlak složek plynné směsi</i>

p_λ		<i>snížení amplitudy vstupní vlny ve výsledném záznamu</i>
q		<i>číselné vyjádření odstínu (0 - 255 pro 8 bit)</i>
R		<i>poloměr schlierovského objektu symetrického podle osy symetrie</i>
\mathcal{R}		<i>refrakce směsi</i>
$\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2$		<i>refrakce složek směsi</i>
\mathbf{r}		<i>vzdálenost od počátku v cylindrickém systému souřadnic</i>
\vec{r}		<i>polohový vektor určující bod v prostoru</i>
S		<i>citlivost</i>
$S_{fáz}$		<i>fázová citlivost</i>
S_A	(m ²)	<i>rozměr apertury (při difrakci)</i>
\mathcal{S}		<i>Tabelované hodnoty Fresnelova integrálu</i>
Δs	(m)	<i>rozdíl optické dráhy</i>
t	(s)	<i>čas</i>
t_λ		<i>transmisní funkce objektu</i>
u		<i>proměnná mezi Fresnelova integrálu</i>
v	(m.s ⁻¹)	<i>rychlost (zvuku) v daném prostředí</i>
v		<i>proměnná mezi Fresnelova integrálu</i>
W		<i>Wollastonův hranol; číslování odpovídá pořadí v sestavě</i>
w	(m)	<i>rozměr gradientní oblasti gradientního filtru</i>
\mathbf{x}		<i>osa x (horizontální) kartézského souřadnicového systému</i>
x_1		<i>bod průniku paprsku do objektu</i>
x_2		<i>bod opuštění objektu paprskem</i>
x		<i>reálná proměnná Fresnelových integrálů</i>
Δx	(m)	<i>vzdálenost dvou sousedních interferenčních maxim</i>
\mathbf{y}		<i>osa y (vertikální) kartézského souřadnicového systému</i>
\mathbf{z}		<i>osa z (kladná ve směru šíření svazků) kartézského souřadnicového systému</i>
Δz	(m)	<i>rozdíl souřadnice z fokusu neovlivněných svazků od z bříty/filtru</i>
α	(C.m ² .V ⁻¹)	<i>molární polarizovatelnost</i>
β		<i>součinitel objemové tepelné roztažnosti</i>
δ	(°)	<i>separační úhel ordinárního a extraordinárního svazku</i>
$\delta\varepsilon$	(°)	<i>nejistota určení úhlu</i>
ε	(°)	<i>úhel odchylení paprsků objektem</i>
ε'	(°)	<i>obraz úhlu odchylení paprsků objektem; úhel který svírají interferující vlny</i>
ε_x	(°)	<i>úhel odchylení ovlivněného paprsku v ose x</i>
ε_y	(°)	<i>úhel odchylení ovlivněného paprsku v ose y</i>
ε_{min}	(°)	<i>nejmenší detekovatelný úhel</i>
ε_{max}	(°)	<i>největší detekovatelný úhel</i>
Θ	(°)	<i>úhel, který svírají interferující ordinární a extraordinární svazek</i>
μ_{OBJ}		<i>mikroskopový objektiv</i>
κ_1, κ_2	(m ⁻³)	<i>koncentrace složek směsi</i>
λ	(m)	<i>vlnová délka použitého světla</i>
ρ	(kg.m ⁻³)	<i>hustota</i>
τ		<i>reálná proměnná pro výpočet Fresnelových integrálů</i>
ϕ	(m)	<i>průměr prvku (zrcadla, objektivu, čočky)</i>
φ		<i>fáze vlnění</i>
$\Delta\varphi$	(m)	<i>fázový rozdíl</i>
Ψ		<i>difrakční vlna</i>
Ψ_r		<i>stav vlny ve vyšetřovaném bodě v případě šíření neovlivněného překážkou</i>
ω	(s ⁻¹)	<i>úhlová frekvence</i>

2 Abstrakt

Cílem práce bylo popsat jednotlivé sestavy pro zobrazení šlirovou metodou a jejich užití ve výukovém procesu. Práce popisuje množství běžně užívaných sestav i principů realizace schlierových metod zobrazení. Do popisu jsou zahrnuty specifika pro laboratorní realizaci i možnosti kombinací jednotlivých prvků schlierových sestav. Jsou zdůrazněny požadavky pro laboratorní realizaci i aplikace popsaných metod. Pro praktické ověření funkčnosti byly vybrány dvě sestavy. Sestava vycházející z architektury Toeplerovy sestavy se dvěma čočkami, která využívá fázového filtru realizovaného pomocí Wollastonova hranolu a jednozrcadlová sestava s prostorovým břitem. Obě sestavy byly odzkoušeny řadou experimentů, jejichž cílem bylo vybrat kvalitativní experimenty pro použití ve výukovém procesu. V didaktické části byla popsána použitelnost jednotlivých metod a aplikací s ohledem na možnosti jejich začlenění do výuky. Byly doporučeny vhodné pokusy pro základní, střední a vysoké školy. Experiment týkající se přenosu tepla zářením a prouděním byl použit ve výuce žáků tercie osmiletého gymnázia.

3 Abstrakt

The aim of diploma thesis was to describe the individual sets for the imaging by schlieren method and their use in the education process. The diploma thesis describes a number of commonly used sets, as well as the principles of realization of schlieren methods of imaging. The description includes specifics for laboratory implementation as well as the possibility of combinations of elements of schlieren sets. The requirements for laboratory implementation and application of the methods are described. For practical verification of functionality two apparatuses were selected - an apparatus based on the architecture of a Toepler assembly with two lenses, which uses a phase filter realized with Wollaston prism, and a single-mirror apparatus with a spatial edge. Both apparatuses were tested in a series of experiments to select qualitative experiment for the usage in the education process. In the methodological part of thesis the possibilities of single methods and applications are described, with regard to the possibility of their integration in education. Appropriate experiments were recommended for basic schools, secondary schools and higher education. Within diploma thesis, the experiment concerning heat transfer by radiation and convection was implemented in the process of teaching of third-year high school students.

4 Vysvětlení termínů a formy odkazů používaných v práci

Schlieren, schliera, šlíra	- nehomogenita indexu lomu v prostředí
Schlierový objekt	- objekt obsahující schliery
Ovlivněné paprsky	- paprsky, jejichž stav nebo směr šíření byl ovlivněn schlierovým objektem
Neovlivněné paprsky	- paprsky, jejichž stav nebo směr šíření nebyl ovlivněn schlierovým objektem
Ovlivněné svazky	- svazky ovlivněných paprsků
Neovlivněné svazky	- svazky neovlivněných paprsků
Schlierová sestava	- souhrn použitých optických součástí a jejich uspořádání, umožňující realizaci schlierové metody zobrazení
Detekční oblast	- prostor použitelný pro měření schlierového objektu
Filtr schlierového zobrazení	- optická součást separující ovlivněné a neovlivněné paprsky.

Vysvětlivka: v textu práce je uvedeno v závorkách [] odkazy na literaturu. Čísla rovnic jsou uváděna v závorkách (). Obrázky jsou značeny obr.

5 Úvod

Schlieren, tedy „schliery“, někdy také „šlíry“, jsou nehomogenitami indexu lomu ve skle. Jejich systematické pozorování má počátky v díle *Micrographia* od R. Hooke [36], na nějž přímo navazoval Ch. Huygens [59], který při pozorování schlier ve skle dal metodě jméno. Práce zabývající se nehomogenitami indexu lomu v transparentním prostředí rozpracovali A. Toepler [85], a J. B. L. Foucault [74]. Základní metody jejich pozorování pomocí schlierových zobrazovacích technik zdokonalili a rozšířili paletu pozorovaných objektů o tepelné fluktuace rázové vlny a hustotní nehomogenity. V této práci jsou obecně jako schlierovské objekty označovány všechny transparentní látky s nehomogenitami indexu lomu. Zobrazení projevů nehomogenit je možné metodami interferenčními, stínovou metodou nebo některou ze schlierových metod.

Interferenční metody rozdělí koherentní světelný svazek na dva, z něhož jeden prochází částí aparatury se zkoumaným objektem a druhý, referenční, je veden jinou cestou. V rovině zobrazení následně oba svazky interferují. Touto metodou se ve svém díle zabýval E. Mach [58] během působení na Karlově univerzitě. Zobrazoval takto rázové vlny a obtékání rychle letících těles vzduchem. Interferenční metody jsou citlivé přímo na hodnotu indexu lomu, proto jsou snadno kvantifikovatelné, ale jejich užití je limitováno malým polem vyšetřovací oblasti, komplikovanou konstrukcí a dalšími konstrukčními limity. Nejsou vhodné pro zobrazení všech schlierovských objektů.

Stínové metody jsou velmi jednoduché. Vyžadují pouze světelný zdroj a schlierovský objekt. Pro lepší kvalitu zobrazení se může přidat i zobrazovací soustava. Paprsky, které změni směr na schlierovském objektu, dopadnou do zobrazovací roviny na jiné místo, než kam by dopadli bez ovlivnění objektem. To má za následek nehomogenní intenzitu ozáření zobrazovací roviny. V některých místech dojde k poklesu intenzity vlivem absence odchýlených paprsků, v jiných místech dojde k nárůstu intenzity ozáření vlivem superpozice intenzity ovlivněných a neovlivněných paprsků. Stínová metoda je citlivá na změnu gradientu indexu lomu a prakticky není možné provádět její kvantifikaci. Tato metoda je principiálně velice jednoduchá, ale její citlivost i kontrast zobrazení jsou velmi malé.

Metody schlierové využívají k zobrazování schlierovského objektu prostorový, fázový nebo polarizační filtr. Po průchodu filtrem dojde k superpozici intenzit, nebo k interferenci ovlivněných a neovlivněných paprsků, což má za následek zviditelnění projevů gradientu indexu lomu. Metoda je ve své podstatě kvalitativní, ale je možné vhodnou konstrukcí a provedením umožnit její částečnou kvantifikaci.

6 Teoretický popis schlierových metod zobrazení

Teoretické části práce se zabývají zhodnocením literatury a teoretickým popisem schlierových metod, způsobem vzniku schlierového zobrazení, způsoby detekce i základními konstrukcemi sestav pro schlierové zobrazování, jejich specifickými požadavky na realizaci a aplikacemi.

6.1 Zhodnocení literatury

Metody schlierovského zobrazení jsou dnes popsány v literatuře a odborných publikacích poměrně dobře. Jejich prudký rozvoj ve 20. století, inicializovaný technickým pokrokem a rozvojem nadzvukové i záznamové techniky měl za následek jejich hlubší studium i teoretický popis. V dnešní době existují desítky sestav, využívající tohoto způsobu zobrazování. Tato práce se opírá o rozpracování problematiky v soudobých publikacích G. S. Settles [74], M. Hugenschmidt [41], W. Rueckner [14] a mnoha dalších publikací, které se zabývají praktickým použitím schlierových metod jako nástroje analytického i demonstračního. Práce aplikují

poznatky v oblastech vysokorychlostního proudění plynů a plazmy, obtékání profilů tekutinami, zejména při nadzvukových rychlostech, studiu rázových vln a mechaniky tekutin, nebo v oblasti bezkontaktní analýzy tepelné distribuce v plazmatu a dalších.

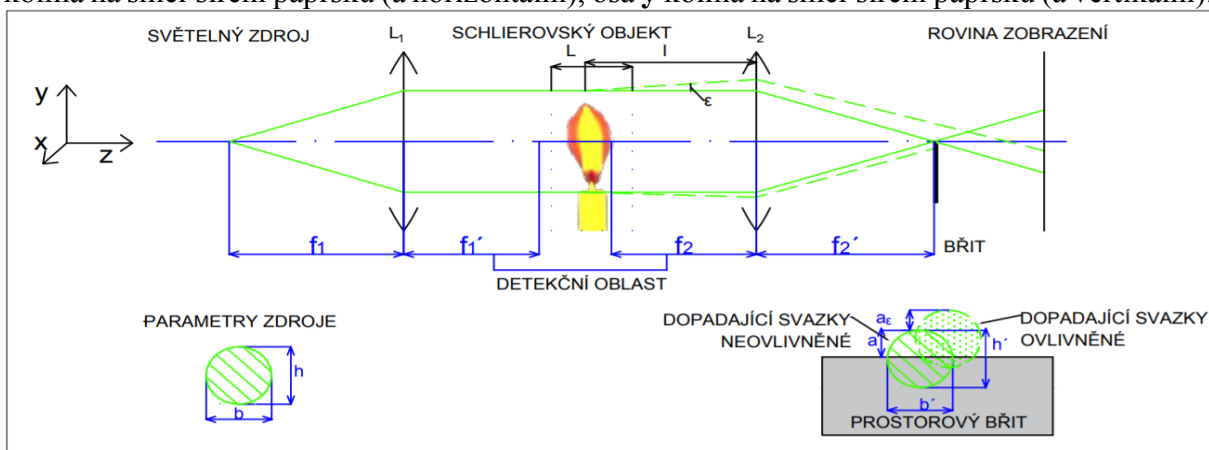
V oblastech teoretického popisu byly podkladem zejména práce I. Vyšina, O. Lepial, Z. Bouchala, B. Havelky, M. Borna popisující geometrickou a paprskovou optiku. Ačkoli nebylo cílem provést precizní matematický popis jednotlivých metod, z důvodu hlubšího pochopení jevů spojených s popisem při difrakci a činnosti jednotlivých prvků soustav byly prostudovány též práce L. M. Sorokoa, L. A. Vasileva a dalších.

Při zpracovávání didaktických aspektů práce byly prostudovány zejména z publikace R. Holubové, O. Lepila, M. Bednařika a O. Obsta.

6.2 Princip měření a zobrazování schlierovými metodami

Schlierové metody převádějí gradient indexu lomu na rozdíly v intenzitě záření v obrazové rovině. Schlierovský objekt se vyznačuje nehomogenitami indexu lomu (schlierami). Průchodem světelného svazku nehomogenitou, dojde k ovlivnění svazku odchýlením od přímočarého šíření, změnou fáze, případně polarizačního stavu. Informace je získávána separací neovlivněných a ovlivněných paprsků, převáděna pomocí vhodného „schlierového filtru“ na prostorovou modulaci intenzity záření, ta je dále zaznamenána a interpretována kvalitativně, či kvantitativně. Filtry schlierového zobrazení mohou fyzicky blokovat část paprsků ovlivněných nebo neovlivněných (břity, clony, masky), pozorovat a vyhodnocovat změny zobrazení definovaného pozadí, umožnit průchod paprsků s vybranou polarizací, nebo vyhodnocovat vzájemný fázový rozdíl paprsků. V případě užití metod založených na geometrické optice (břity) je podstatná velikost a tvar zdroje (zdrojů) světla, jeho pozice vzhledem k optické ose, eventuálně v případě polychromatického zobrazování jeho vyzařované spektrum. Při použití metod využívajících vlnové povahy světla je pak typicky podstatná informace o polarizačním stavu, vlnové délce, nebo koherenční délce světelného zdroje.

Pro výpočty a popisy je použito kartézského systému souřadnic (x , y , z). Počátek bude umístěn v bodě světelného zdroje a kladný směr osy z bude ve směru šíření axiálního paprsku, osa x kolmá na směr šíření paprsku (a horizontální), osa y kolmá na směr šíření paprsku (a vertikální).



Obr. 1. - Základní parametry sestavy pro schlierové zobrazování:

$L1, L2$ - spojné čočky; $f1, f2$ - předměťová ohniska; $f'1, f'2$ - obrazová ohniska; L - rozměr objektu v ose z ; l - střední vzdálenost objektu od $L2$ v ose z ; ϵ - úhel odchýlení ovlivněného paprsku (v ose x); BŘIT - filtr schlierovského zobrazení, (prostorový břit); PARAMETRY ZDROJE - h - výška zdroje (rozměr v ose y); b - šířka zdroje (rozměr v ose x); h' - výška obrazu zdroje (rozměr v ose y); b' - šířka obrazu zdroje (rozměr v ose x); a - část obrazu zdroje, nezastíněná břitem; $a\epsilon$ - posunutí obrazu zdroje odchýlením paprsku na schlierovském objektu o úhel ϵ .

Následuje popis činnosti sestavy pro schlierové zobrazení obr. 1. Světelný zdroj se umísťuje do ohniska čočky, nebo objektivu L_1 , přičemž je možno využít další aparatury, která vytvoří světelný zdroj vhodné velikosti a tvaru. Za čočkou L_1 vznikne homogenní pole kolineárních svazků. Mezi čočkami, či objektivy L_1 a L_2 se nalézá detekční oblast, kam se umísťuje schlierovský objekt. V literatuře se někdy vyskytuje označení „Toeplerova schlierová komora“. Za čočkou L_2 , v prostoru fokusu neovlivněných svazků, což je v tomto případě v ohnisku čočky L_2 , se umísťuje filtr schlierového zobrazení, v tomto případě prostorový břit.

Obecně je použití sestav optických prvků, vytvářející vhodné světelné pole v detekční oblasti a usměrňující svazky do prostoru filtru schlierového zobrazení, stejně jako způsob detekce a zobrazení výsledku do značné míry nezávislé na způsobu vytvoření schlierového zobrazení. Je však zásadní pro určení základních parametrů výsledné sestavy schlierového zobrazení a určuje možnou velikost detekčního pole, rozměr celé sestavy schlierového zobrazení, a především citlivost celé použité schlierové sestavy. Tato práce zpracovává světelné zdroje a filtry schlierového zobrazení dohromady, protože světelný zdroj a filtr schlierového zobrazení nelze kombinovat zcela libovolně a vzájemně se předurčují parametry světelného zdroje a vhodné způsoby filtrace. Naproti tomu způsoby detekce výsledku i zmíněné sestavy optických prvků lze do výsledné sestavy schlierového zobrazení vhodně kombinovat a jsou proto popisovány nezávisle. V práci jsou pro jednoduchost vysvětlovány principy a zákonitosti schlierového zobrazení na příkladu sestavy obr. 1, kterou je v praxi možno nahradit jinou sestavou, například některou z uvedených sestav v podkapitolách kapitoly 6.8. Také je pro jednoduchost při popisu sestav používán prostorový břit. Ten možno zaměnit za jiný filtr schlierového zobrazení se zdrojem světla vhodných parametrů, kterým se věnuje kapitola 6.4. [74], [90], [77], [65], [72]

6.2.1 Teoretický popis schlierových objektů a jejich kvantifikace

Při popisu vlivu schlierovských objektů vychází práce zejména z publikací L. A. Vasileva [90], G. S. Setlese [74] a D. Stevensona [82]. Světlo je v detekční oblasti ovlivněno vnějším fyzikálním působením indukovaným schlierovským objektem. Světlo je speciálním případem elektromagnetického vlnění. Vlnovou rovnicí je možné psát ve tvaru:

$$\text{rot}^2 \vec{E}(\vec{r}, t) - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}(\vec{r}, t)}{\partial t^2} \quad (1).$$

Zde \vec{E} - vektor elektrické intenzity elektromagnetického vlnění c - fázová rychlost světla ve vakuu, \vec{r} - polohový vektor určující bod v prostoru a t - čas, ve kterém vlnění vyšetřujeme [10]. Při svém šíření se světlo řídí Fermatovým principem. Aplikací Fermatova principu na chod paprsků a Eulerovy rovnice, získáme:

$$\frac{d}{dS} \left(n \frac{dx}{dS} \right) = \frac{dn}{dx} \quad (2),$$

$$\frac{d}{dS} \left(n \frac{dy}{dS} \right) = \frac{dn}{dy} \quad (3),$$

$$\frac{d}{dS} \left(n \frac{dz}{dS} \right) = \frac{dn}{dz} \quad (4).$$

Pro světelné svazky, šířící se v kladném směru osy z , lze Eulerovy rovnice vyjádřit takto:

$$\frac{d^2 x}{dz^2} = \left[1 + \left(\frac{\partial x}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial z} \right)^2 \right] \cdot \left[\frac{d \ln n}{dx} - \frac{dx}{dz} - \frac{d \ln n}{dz} \right] \quad (5),$$

$$\frac{d^2 y}{dz^2} = \left[1 + \left(\frac{\partial y}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial z} \right)^2 \right] \cdot \left[\frac{d \ln n}{dy} - \frac{dy}{dz} - \frac{d \ln n}{dz} \right] \quad (6).$$

Na rozhraních splňuje světlo zákon lomu. Malé změny indexu lomu n způsobí velmi malé odchylky ε od přímého šíření světelných svazků. Derivováním rovnic (4) a (5) lze odvodit fázový rozdíl $\Delta\varphi$ a výchylku ε způsobenou optickou nehomogenitou:

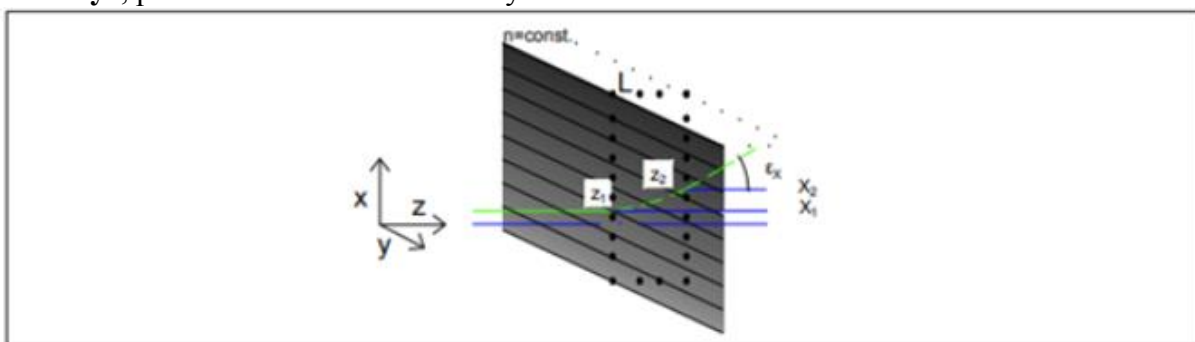
$$\Delta\varphi = (x, y) \approx \frac{1}{c} \int_{z_1}^{z_2} [n(x, y, z) - n_0] dz \quad (7),$$

$$\tan \varepsilon_x \approx \frac{1}{c} \int_{z_1}^{z_2} \frac{d \ln n(x, y, z)}{dx} dz \quad (8),$$

$$\tan \varepsilon_y \approx \frac{1}{c} \int_{z_1}^{z_2} \frac{d \ln n(x, y, z)}{dy} dz \quad (9),$$

přičemž $|z_1, z_2| = L$. L - rozměr objektu v ose z , viz obr. 1.

Při analýze vlivu průběhu nehomogenit na šíření ovlivněných svazků je vhodné uvažovat dva případy tvaru schlier. Schliery jejichž gradient indexu lomu má jeden směr a jeho zakřivení je možno zanedbat a schliery osově symetrické, u nichž je možné nalézt osu symetrie a index lomu se mění ve směru kolmém k této ose. Na obr. 2. je znázorněno odchýlení paprsků schlierovským objektem (rozměru L ve směru šíření paprsku) o úhel ε_x . Schliera má konstantní index lomu v rovině yz , přičemž v kladném směru osy x index lomu roste.



Obr. 2. - Schlierovský objekt s gradientem indexu lomu ve směru osy x :

L - rozměr objektu (ve směru osy z); ε_x - úhel odchýlení paprsku od přímočarého šíření (ve směru osy x); z_1, x_1 - bod průniku paprsku do objektu; z_2, x_2 - bod opuštění objektu paprskem.

Pak lze předchozí vztahy zjednodušit a platí

$$\varphi = \frac{1}{c} \cdot (n - n_0) \cdot L \quad (10),$$

$$\varepsilon_x = \frac{L}{n_0} \cdot \frac{\partial n}{\partial x} \quad (11),$$

$$\varepsilon_y = \frac{L}{n_0} \cdot \frac{\partial n}{\partial y} \quad (12).$$

Pokud je index lomu spojitě rostoucí nebo klesající, lze psát pro vyjádření hodnoty indexu lomu v prostoru, ve kterém došlo k ovlivnění paprsku a jeho odchýlení o úhel ε_x :

$$n(x, y) = n(x_0, y) + \int_{y_0}^y \frac{\partial n}{\partial y}(x, y) dy \quad (13).$$

Přičemž pro úhel odchýlení ε_x platí:

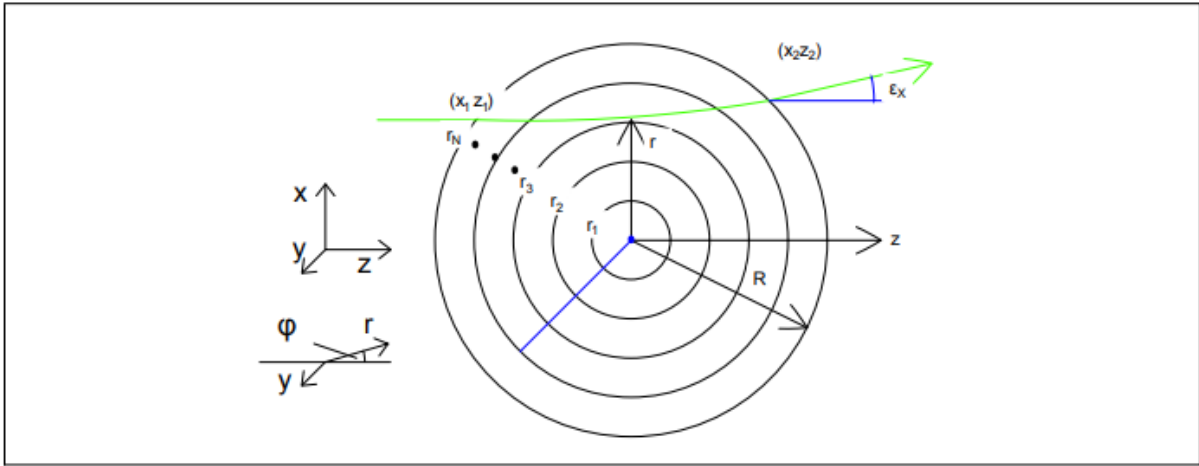
$$\varepsilon_x = \frac{L}{x_2 - x_1} (n(x_2) - n(x_1)) \quad (14).$$

V případě nehomogenit symetrických podle jedné osy je nutné pro trasování paprsků procházejících schlierovským objektem, kalibraci nebo rekonstrukci objektu, zahrnout i válcový tvar nehomogenity. Je výhodné tvar nehomogenity popisovat v cylindrickém souřadném systému, kde je nehomogenita symetrická podle osy symetrie, byla zvolena vertikální osa y . Proto je zde použit i systém cylindrických souřadnic y, r, φ . Trajektorii paprsků uvnitř nehomogenity, jejíž rozměr ve směru šíření $2R = L$ lze vyjádřit takto:

$$(\varepsilon_x)_j = \frac{2}{n_0} \int_{r_j}^R \frac{\partial n}{\partial r} \cdot \frac{r_j dr}{\sqrt{r^2 - r_j^2}} \quad (15),$$

$$(\varepsilon_y)_j = \frac{2}{n_0} \int_{r_j}^R \frac{\partial n}{\partial r} \cdot \frac{r dr}{\sqrt{r^2 - r_j^2}} \quad (16).$$

Tento vztah je možno řešit několika způsoby. Jednou z možností je aproximační řešení využívající rozdělení celého detekčního prostoru na ekvidistantní intervaly "válcové slupky".



Obr. 3. - Schlierovský objekt je rotačně symetrický podle osy y.

V cylindrických souřadnicích y, r, φ : R - poloměr objektu; r_1 - r_n intervaly pro popis oblastí se shodným indexem lomu. V kartézských souřadnicích x, y, z : z_1, x_1 - bod průniku paprsku do objektu; z_2, x_2 - bod opuštění objektu paprskem; ε_x - úhel změny směru šíření paprsku.

Na obr. 3. se paprsek šíří ve směru osy z , index lomu směrem do středu objektu klesá (situace odpovídá například kanálu horkého vzduchu). Tento přístup publikoval, dle L. A. Vasileva [90], H. Schardin. Pro nehomogenitu válcového tvaru pak lze psát:

$$(\varepsilon_x)_j = \frac{2}{n_0} \sum_{i=j}^{N-1} \left(\frac{\partial n}{\partial r} \right)_i \cdot r_0 \cdot \ln \frac{r_j + \sqrt{r_i^2 - r_j^2}}{r_{j-1} + \sqrt{r_{i-1}^2 - r_j^2}} \quad (17),$$

$$(\varepsilon_y)_j = \frac{2}{n_0} \sum_{i=j}^{N-1} \left(\frac{\partial n}{\partial r} \right)_i \cdot \left(\sqrt{r_i^2 - r_j^2} - \sqrt{r_{i-1}^2 - r_j^2} \right) \quad (18).$$

Ze vztahů (11), (12) a (17) vyplývá, že odchýlení prostorově oddělí ovlivněné svazky. Složky gradientu indexu lomu $\partial n / \partial x$ a $\partial n / \partial y$ eventuálně $\partial n / \partial r$ způsobují lom světla v příslušném směru. Vhodně umístěnou clonou jsme schopni tyto různě odchýlené paprsky filtrovat, jak bude uvedeno v kapitole 6.4.6 na straně 20. Obraz na záznamovém médiu je tvořen světlejšími a tmavšími oblastmi.

6.2.2 Pozorovatelnost schlierovského objektu a nároky na citlivost sestavy.

Běžně dochází k šíření elektromagnetické vlny v prostředí s plynulou změnou indexu lomu, což je případ podzvukových aplikací schlierové metody. Velikost gradientu indexu lomu určuje velikost úhlu odchýlení ε , který je v praxi jedním ze základních kritérií celé sestavy pro pozorování schlier. Pro pozorování plamene, rázových vln s rychlostmi od 0,5 (Machů), je nutná citlivost sestavy řádově na jednotky až desítky úhlových minut. Při studiu jemnějších fluktuací hustoty, gradientů hustoty vlivem pružné deformace transparentních objektů, obtékání

objektů vzduchem při rychlostech desítek až stovek ms^{-1} a podobně, je použitelná sestava schopná rozlišovat úhly řádově v jednotkách úhlových minut až desítkách úhlových vteřin. Pro pozorování slabých tepelných fluktuací (např. teplo od ruky), obtékání těles tekutinou (plynem) při nízkých rychlostech, pozorování turbulentního a laminárního proudění a podobně, musí být sestava schopna zobrazovat úhly odchýlení ε menší, než 10 úhlových vteřin. Pro zpracování zvukových vln, v závislosti na výkonu zdroje, je pak doporučeno, aby sestava byla schopna rozlišovat úhly 2-4'', přičemž dle [74] znemožňují konstrukční limity sestav schlierového zobrazení neomezeně zmenšovat úhel, jež je možné zobrazit. Zobrazení výrazně menších úhlů, než dvě úhlové vteřiny konstrukční limity sestav nedovolují. [7] [74]

6.2.3 Šíření různých vlnových délek

Vliv vnějšího fyzikálního působení (schlierovským objektem indukovaný gradient indexu lomu) se může projevit odlišnými hodnotami úhlu odchýlení ε nebo fázového rozdílu $\Delta\varphi$ pro odlišné vlnové délky. Fázová rychlost šíření světla v daném prostředí je závislá na vlnové délce světla (v_λ). Závislost indexu lomu na vlnové délce se označuje jako disperze indexu lomu. V prostředí s normální disperzí indexu lomu roste index lomu n_λ se zkracováním vlnové délky světla λ . Disperze indexu lomu může mít vliv také na úhel odchýlení ε pro různé vlnové délky. Pro demonstraci se omezíme na nejjednodušší případ spojitě rostoucího indexu lomu kolmo ke směru šíření svazku:

$$(e_x)_\lambda = \frac{L}{n_{0,\lambda}} \cdot \frac{\partial n_\lambda}{\partial x} \quad (19),$$

$$(e_y)_\lambda = \frac{L}{n_{0,\lambda}} \cdot \frac{\partial n_\lambda}{\partial y} \quad (20),$$

přičemž $n_{0,\lambda}$ je index lomu v prostředí testovací oblasti bez nehomogenit. [90]

6.3 Zdroje světla

Zdroje světla a způsob separace ovlivněných a neovlivněných paprsků spolu velice úzce souvisí a nelze je tedy posuzovat zcela odděleně, jako například sestavu optických prvků upravující chod paprsků od zdroje do detekční oblasti a následně do prostoru břitu, nebo způsob detekce výsledku, které je možno do značné míry hodnotit nezávisle a kombinovat volně.

V počátcích schlierových zobrazovacích metod byly vhodnými zdroji světla svíčky, popřípadě odrazy světla ze slunce. Postupem času se škála světelných zdrojů rozšiřovala od plynových lamp přes obloukové lampy, nebo vláknové žárovky, až po polovodičové a laserové zdroje. Dnes je možné využít širokou škálu světelných zdrojů různých vlastností.

Chceme-li nejvyšší možný měřicí rozsah a citlivost, pak je k použití nejvhodnější obdélníkový zdroj světla s příčným rozměrem několika mikrometrů. Zmenšování minimálního detekovatelného odchýlení paprsků je lineární se zmenšováním (nejmenšího) rozměru zdroje světla, musí však korespondovat s tvarem a polohou vhodného schlierového filtru (břitu). Právě proto je k detekování nejmenších detailů vhodné využít co možná nejmenšího zdrojového světelného bodu. Díky většímu počtu samostatných bodových zdrojů se zvětší rozlišení stupňů šedi ve výstupním obraze. [74] [82], [95], [74], [65]

6.3.1 Některé příklady používaných světelných zdrojů

- Jiskry - jedná se o druhou nejstarší používanou metodu pro schlierové zobrazovací metody. Velkými příznivci užívání jisker pro zobrazování schlierovými metodami byli například Toepler a Mach, zejména proto, že tato metoda umožňuje zaznamenávat i velmi

rychlé děje (a to i na fotografické desky). Hlavním zdrojem světla pro záznam vysokorychlostních dějů zůstaly až do poloviny 20. století. [74], [82]

- Kompaktní obloukové lampy - rtuťová oblouková lampa emitující světlo z plasmy je jako světelný zdroj účinnější než žárovky. Doba pulzu může trvat několik mikrosekund. Proto se doporučuje zejména ke studiu vysokorychlostních dějů pomocí schlierových sestav s prostorovým břítem. Spektrum s dobře známými ostrými peaky několika vlnových délek je vhodné i pro barevné aplikace. Dalšími možnostmi jsou výbojky xenonové a argonové. [74], [82]
- Elektronické výbojky - výboj má délku trvání řádově jednotky milisekund, ale opakovací doba záblesku je příliš dlouhá pro studium nadzvukových jevů. Je ale dostačující pro klasickou schlierovou fotografii pomalých dějů. Při použití vhodné clony zdroje a adekvátního prostorového bříte má několik výhod. Je možné jej použít s každým běžným fotoaparát, čímž získáme velmi snadno světelný zdroj s trigrem, provázaný s fotoaparát. Úpravou objektivu a vhodným pozadím můžeme získat velmi jednoduchou sestavu pro aplikaci metod se specifickým pozadím [74]. Použití stroboskopu vynalezeného Früngelem a Edgertonem je vhodné pro záznam pomalejších dějů. Ve stroboskopu se používají především xenonové a argonové výbojky, a obdélníkový tvar výboje je výhodný k osvětlení štěrbin. [74], [82]
- Žárovky - tyto zdroje jsou velmi snadno dostupné. Moderní wolfram-halogenové žárovky jsou i efektivní a vyzařované spektrum je podobné záření absolutně černého tělesa. Podle tvaru vlákna a svítidla mohou mít i vhodnou vyzařovací charakteristiku. Při užití v barevných metodách musíme zohlednit nižší intenzitu vyzařování kratších vlnových délek. Běžně se využívají rovněž k rovnoměrnému osvětlení v diaprojektorech a meotarech. Při jejich použití je nutné použít kondenzor a vhodnou vstupní clonu. [74], [82]
- LED diody - s rozvojem polovodičové techniky začaly převládat ve většině schlierových zobrazovacích metod zdroje LED. Jejich nespornými výhodami jsou malý rozměr vyzařovací oblasti, velká efektivita vyzařování, velmi snadná obsluha i použití, i velmi rychlá odezva a doba sepnutí/vypnutí (je řádově v desítkách μs). Další nespornou výhodou je dostupnost v rozmanité škále vyzařovacích spekter. Mohou být monochromatické, polychromatické, bílé nebo RGB. Nevýhodou je výkonový limit vyzařování a komplikovanější chlazení diod s výkonem nad 5 W. Diody emitují světlo s koherenční délkou odpovídající rozměru emitující oblasti, tedy řádově desítky až stovky μm , proto se dá považovat toto záření za nekoherentní. [45], [46], [70], [74], [82], [104], [25]
- Lasery a laserové diody - vyzařují koherentní světlo, které je podmínkou správné funkce některých schlierových technik. Výhodou při užití schlierových metod jako kvantitativních technik je také čistě monochromatický světelný zdroj. Proto mají lasery a laserové diody nezastupitelnou roli v oblasti schlierového zastoupení. Jejich použití však vyžaduje invenční přístup. Jejich malá stopa má velmi malou rozbíhavost, proto se s výhodou využívá vláknových vlnodů, na jejichž výstupu jsou svazky rozbíhavé a zařazením vláknového polarizačního kontroléru můžeme připravit vhodné polarizační stavy na výstupu. Druhou alternativou je pak soustava objemových prvků (zrcátek, objemových děličů...), které svazek z laserového zdroje vhodným způsobem zavedou na vstupní objektiv soustavy, jež připraví rozbíhavý svazek a jehož rovina je pro soustavu rovinou světelného zdroje. Při použití laserového zdroje nelze pozorovat výsledné zobrazení přímo. Je nutné užít fotografických záznamových zařízení. Přitom je nutné věnovat pozornost přenášené energii záření, protože vysokoenergetické laserové zdroje by mohly poškodit optické prvky. Laserové zdroje také nejsou příliš vhodné pro schlierové sestavy s jednoduchým prostorovým břítem, který je nutno nahrazovat prostorovým gradientním filtrem či prostorovým odrazným břítem. Jednoduchý prostorový břit by byl zdrojem

difrakcí, které by v tomto případě měly výrazný vliv na výsledné zobrazení. [74], [82], [80], [90], [77], [41], [64], [100]

6.3.2 Velikost

Zdroje světla lze vnímat jako technický problém. Je požadován co nejvyšší výkon, ale zároveň co nejmenší rozměry. Výkon světelného zdroje souvisí s rychlostí záznamu, proto vyšší nároky v tomto směru kladou sestavy pro zobrazování rychlých dějů vyžadující velmi krátké expoziční doby každého snímku. Sestava však nebude pracovat efektivně, je-li rozměr obrazu zdroje (obr. 1. - b' , h' , na straně 5) větší, než dvojnásobek odchylení paprsků od původního směru (obr. 1. - a_ε). Parametry světelného zdroje pro sestavy pro schlierové zobrazení je možné ovlivnit i tím, že vytvoříme vhodnou aparaturu pro úpravu chodu svazků od zařízení emitujícího světlo, před zavedením do sestavy pro schlierové zobrazení. Jako vhodné se jeví užití kondenzoru, clon, nebo zavedení energie světla do optického vlákna a jako světelný zdroj sestavy pro schlierové zobrazení použít čelo tohoto optického vlákna.

6.3.3 Počet zdrojů

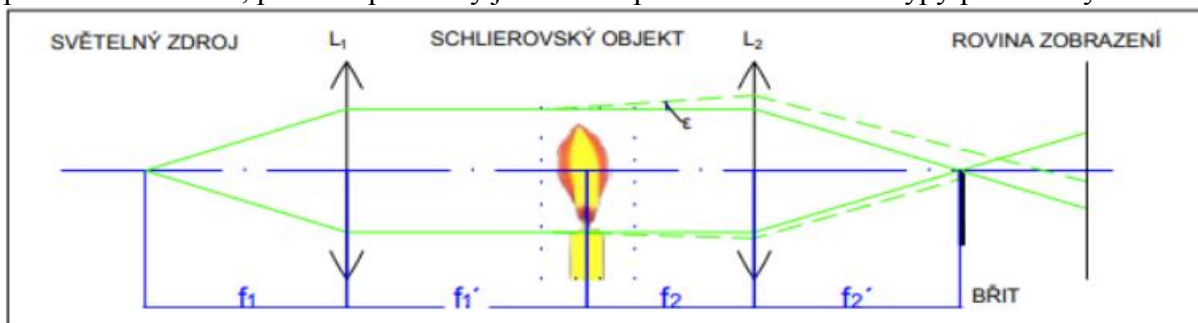
Malý zdroj má vyšší citlivost, nezávislé zdroje snižují koherenci a tím i projevy difrakce, čímž umožňují dále zvyšovat citlivost v jednom směru, simulují tak obdélníkový tvar zdroje. Proto je výhodné využívat většího počtu bodových zdrojů, zejména u metod citlivých převážně na změny indexu lomu v jednom směru [74].

6.3.4 Polychromatické zdroje

Především pro použití barevných schlierových zobrazovacích metod, podrobněji rozvedených v kapitole 6.4.6 na straně 20, je nezbytné volit zdroje o vhodné vyzařovací spektrální charakteristice.

6.4 Činnost prostorového filtru při realizaci schlierových metod zobrazení

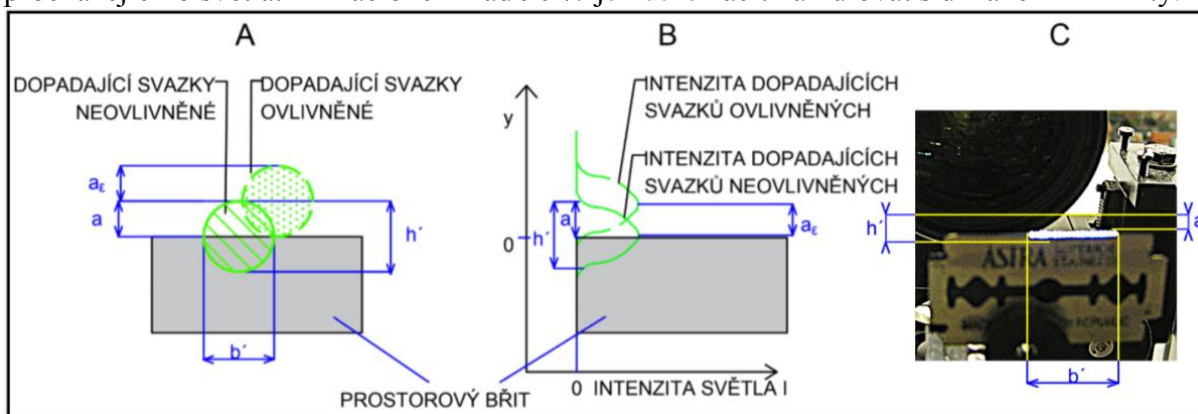
Kapitola vychází zejména z publikací [65], [74], [82], [90]. Prostorový filtr je takový, který využívá změny směru chodu paprsků po průchodu schlierovským objektem a prostorově separuje svazky ovlivněné a neovlivněné. Část svazků přitom cloní nebo filtruje. Pro jednoduchost a názornost bude proveden popis činnosti prostorového filtru na příkladu prostorového břítu, přičemž poznatky je možno aplikovat i na ostatní typy prostorových filtrů.



Obr. 4. - Rozložení prvků v sestavě pro schlierové zobrazení Toeplerova typu:

L_1 , L_2 - spojné čočky, nebo objektivy; f_1 , f_2 - předmětová ohniska; f_1' , f_2' - obrazová ohniska; L - rozměr objektu v ose z ; l - střední vzdálenost objektu od L_2 v ose z ; ε_x úhel odchylení ovlivněného paprsku (v ose x); BŘIT - filtr schlierovského zobrazení (prostorový břit).

Využití břitu je jednou z nejběžnějších užívaných metod. Autor Lopez C. A. [57] ve své práci uvádí, že břit („edge knife“), na obr. 4. - BŘIT, se umísťuje do ohniska prvku (na obr. 4. - L_2) zobrazujícího detekční oblast (v ohnisku se zobrazí ostře světelný zdroj soustavy). Přesná poloha v ohnisku je stěžejní pro správnou funkci. Břit je nutno nastavit tak, aby clonil část procházejícího světla. Při zaclonění nad 90 % je nutno začít kalkulovat s difrakčními limity.



Obr. 5. - Dislokace ovlivněných svazků při průchodu rovinou břitu. h' - výška obrazu zdroje (rozměr v ose y); b' - šířka obrazu zdroje (rozměr v ose y); a - parametr určující jaká část obrazu zdroje nebude zastíněna břitem; a_ϵ - posunutí obrazu zdroje odchýlením paprsku na schlierovském objektu. A situace popsaná geometricky v rovině břitu; B intenzita světla ovlivněných (odchýlených) a neovlivněných (neodchýlených) svazků vzhledem k poloze břitu; C - demonstrace parametrů a , h' na reálné situaci.

Břit lze nahradit clonou, barevnými filtry nebo šterbinami (jak uvádí kapitoly 6.4.5, 6.4.6). Při výběru břitu je nutné zohlednit vlastnosti pozorovaného objektu, a vlastnostem břitu přizpůsobit vlastnosti a tvar světelného zdroje (zdrojů).

Homogenní prostředí se schlierovou sestavou zobrazí jako pole konstantní intenzity. Každá nehomogenita způsobí změnu v tomto konstantním rozložení intenzity. Část intenzity, která není omezená břitem, vytvoří na záznamovém médiu světlejší oblast, ta část intenzity, kterou omezí břit, vytvoří tmavší oblast. Toto rozdělení odpovídá pozitivnímu a negativnímu gradientu indexu lomu ve směru kolmém na břit.

Šlírová metoda je citlivá na první derivace indexu lomu:

$$\frac{dn}{dx} \quad \frac{dn}{dy} \quad (21).$$

Odtud pro derivace intenzity záření I :

$$\frac{dI}{dx} \quad \frac{dI}{dy} \quad (22).$$

Popřípadě analogicky pro změnu intenzity osvětlení E :

$$\frac{dE}{dx} \quad \frac{dE}{dy} \quad (23).$$

Úhel odchýlení od přímého šíření ϵ popsany rovnicemi (11) a (12) na straně 7 způsobí odchýlení obrazu zdroje a_ϵ , jak je naznačeno na obr. 5. Vlivem odchýlení a_ϵ se změní intenzita osvětlení za břitem o ΔE . Má-li měření obsahovat 100 % informace, pak musí projít celý rozměr obrazu zdroje rovinou břitu. Z obr. 5. je patrné, že taková situace nastane, je-li odchýlení obrazu zdroje a_ϵ rovno rozměru zacloněné části obrazu zdroje, tedy:

$$a_\epsilon = h' - a \quad (24),$$

přičemž h' - velikost obrazu světelného zdroje, a - rozměr jeho nezacloněné části. Je obvyklé používat zaclonění 50 %, tedy clonit polovinu obrazu zdroje břitem, pak $a_\epsilon \geq a$. Výsledná

intenzita osvětlení $E + \Delta E$ je proporcionalní ke změně polohy uvažovaného obrazu a_ε , kterou lze vyjádřit pomocí odchýlení paprsku ε objektem a parametrů sestavy:

$$a_\varepsilon = \varepsilon \cdot f_2' \quad (25),$$

přičemž f_2' je ohnisko objektivu (čočky) L_2 viz obr. 4.

6.4.1 Citlivost prostorových filtrů (břítu) v sestavě

Ve smyslu citlivosti, jak ji uvádí Settles [74], je zde uveden podíl kontrastu zobrazení k úhlu odchýlení ovlivněných paprsků (někdy též “kontrastní citlivost” [74]). K zavedení kontrastu zobrazení C je použito intenzita osvětlení E a změny intenzita osvětlení vyvolané odchýlenými paprsky ΔE :

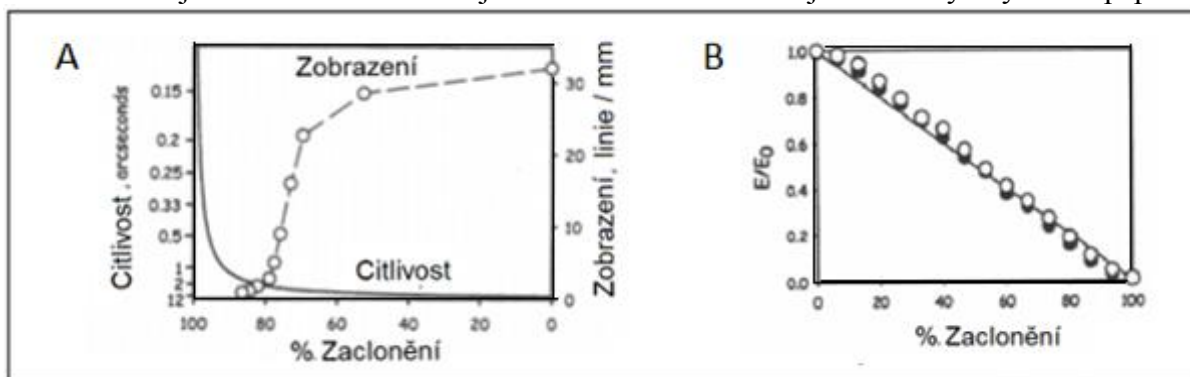
$$C = \frac{\Delta E}{E} \quad (26),$$

citlivost zobrazení S :

$$S = \frac{dC}{d\varepsilon} \quad (27).$$

Podrobnější rozbor vztahů (26) a (25) bude proveden v kapitole 6.9.1 *Citlivost a kontrast zobrazení* na stranách 46 - 47.

Intenzita osvětlení E je z geometrické optiky proporcionalní k úrovni zaclonění, ale také k úhlu ε , proto je E lineární pro refrakční úhly. Toho využívají některé kvantifikačních metody. Změřením intenzity a jejím integrováním lze určit index lomu n nebo hustotu ρ . Nastíněný popis je dostatečný pro případ sestavy obr. 4. při zaclonění do 90 %. Zaclonění se udává v % úbytku zářivého výkonu přenášeného neovlivněným svazkem, a přímo ovlivňuje citlivost sestavy i kontrast zobrazení. Zvýšení zaclonění zvýší i kontrast zobrazení, ale zároveň výrazně zvyšuje nároky na zobrazovací aparaturu. Část slabě odchýlených paprsků neprojde a detekční sestava se zaměřuje na kontrastnější zobrazení silněji odchýlených paprsků.



Obr. 6. - Grafické zhodnocení vlivu zaclonění na citlivost.

Platí pro záznamu na film či digitální kameru. A - Grafické vyjádření vztahu zaclonění, kontrastu zobrazení a citlivosti; B - Vyjádření závislosti podílu intenzity osvětlení v detekční oblasti E_0 a intenzita osvětlení neovlivněných svazků E při různých úrovních zaclonění. Převzato z [74].

Obr. 6 - A popisuje vztah citlivosti a minimálního úhlu odchýlení ovlivněných svazků ε v souvislosti s úrovní zaclonění. Dle práce [74] bylo změřeno sedlo křivky citlivosti při zaclonění 90 %. Text dále zmiňuje, že teoreticky křivka citlivosti začne velmi strmě stoupat, ale při reálném měření naráží další zvyšování citlivosti na limity geometrické optiky a difrakce. Pro běžná měření se doporučuje zaclonění 50 %, ve speciálních případech pro zvýšení kontrastu zobrazení a citlivosti při použití velmi kvalitní zobrazovací techniky 80 %, přičemž již může docházet k podstatné ztrátě informace, jak uvádí Tropea C. a kol. [87] a další [77], [74], [90]. Při zaclonění 100 % se jedná o metody temného pole, pro které je použití břítu s ohledem na

ztrátu informace a nároky na zobrazovací techniku nevýhodné, jak je uvedeno v kapitole 6.4.4 *Metody se světlym polem a temným polem*. Pro rozložení intenzity osvětlení v rovině zobrazení v závislosti na úrovni zaclonění platí přibližné grafické vyjádření:



Obr. 7. - Vliv polohy objektu v detekční oblasti.
Charakteristika převzata z [74].

Na obr. 7 je znázorněna distribuce intenzity osvětlení v obraze schlierovského objektu při různé úrovni zaclonění, na příkladu, kdy má testovací oblast rozměr v intervalu $\langle -1, 1 \rangle$.

6.4.2 Difrakce při užití prostorového filtru - bříty

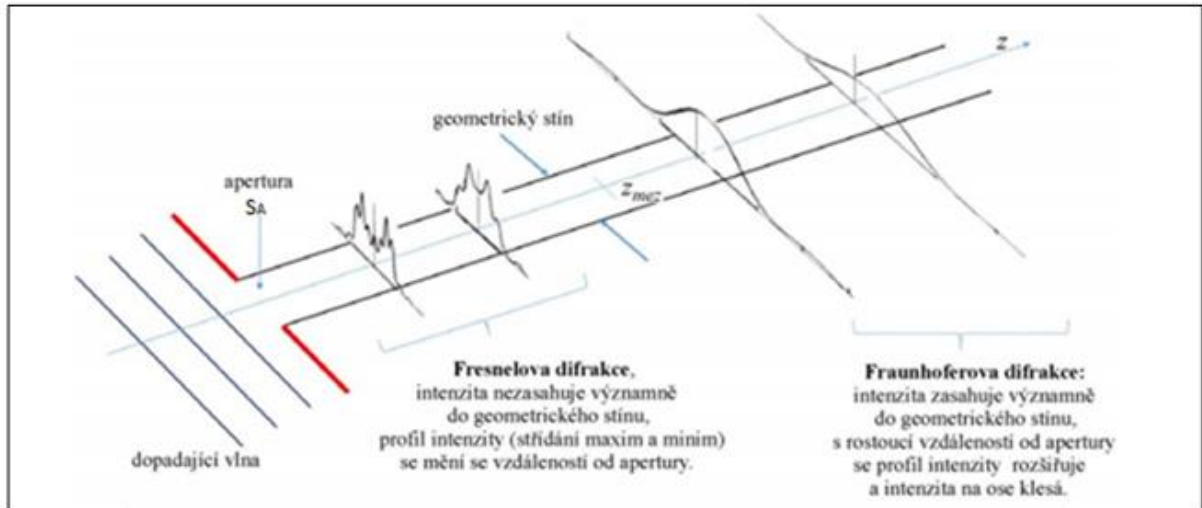
Difrakce tvoří přirozené omezení při zvyšování citlivosti schlierových soustav využívajících břitů, clon či šterbin. Proto je její pochopení a porozumění jejího vlivu na zobrazení podstatné. Ovlivněné svazky nesoucí informaci o objektu se pohybují v těsné blízkosti bříty. Pokud zacloníme větší část svazků, pak ovlivněné svazky odchýlené difrakcí na objektu difragují podruhé na bříty. Blížíme-li se plnému zaclonění neovlivněných svazků, způsobuje difrakce rozostření (“šmouhy” [74]) a vytváří difrakční (“stíny” [74]) kolmé k hranám zobrazovaného objektu. Tento efekt je výraznější u neprůhledných a malých objektů v testovací oblasti. V některých aplikacích se využívá vícenásobný průnik difrakčních obrazců k částečné kvantifikaci měření, což je zmíněno v kapitole 6.8.6.1 na straně 43. Podrobná analýza difrakce na hraně, nebo při schlierovém zobrazení je provedena například v literatuře [79], [74], [90], [26]. Pro vyšetřování difrakce, nechť kulová či rovinná vlna dopadá na překážku, bylo zvoleno následující značení veličin: skalární veličina $A(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ odpovídající komplexní amplitudě velikosti elektrické intenzity pole $|\vec{E}|$

$$|\vec{E}| = A \cdot e^{-i\omega t} \quad (28).$$

Pokud bude zvoleno $\mathbf{z} = 0$ v prostoru překážky, lze za předpokladu vyšetřování monochromatické vlny popsat stav pole v úrovni překážky $A_0 = A(X, Y, 0)$ a stav pole ve vyšetřovaném bodě $A_P = A(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$. Difrakční integrál lze psát ve tvaru:

$$A_P \approx \frac{-i}{\lambda} \iint_{S_A} A_0 \cdot \frac{e^{ikr}}{r} dS_A \quad (29),$$

přičemž zde je S_A - plocha otvoru kolmá na směr šíření (v ose \mathbf{z}); k - vlnové číslo, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$; λ - vlnová délka záření; r popisuje vzdálenost zdroje a podobu dopadající vlnoplochy, například obecně pro kulovou vlnu $r = \sqrt{(x - X)^2 + (y - Y)^2 + (z - Z)^2}$. V případě clony s otvorem S_A se používá Fresnelova a Fraunhoferova aproximace difrakce:



Obr. 8. - Znárodnění Fresnelovy a Fraunhoferovy difrakce za clonou.
Převzato z [26].

Pro Fresnelovu aproximaci, která nahrazuje kulovou vlnu vlnou přibližně parabolickou:

$$\text{Substituce } r: \quad r = z \sqrt{1 + \frac{(x - X)^2 + (y - Y)^2}{z^2}} \approx z \cdot \left(1 + \frac{(x - X)^2 + (y - Y)^2}{2z^2} \right) \quad (30),$$

$$PN: \frac{(x - X)^2 + (y - Y)^2}{z^2} \ll 1 \quad (31).$$

Pro Fresnelovu aproximaci lze psát:

$$A_P \approx \frac{-i}{z \cdot \lambda} e^{i \cdot k \cdot z} \cdot e^{i \cdot k \cdot \frac{(x^2 + y^2)}{2z}} \iint_{S_A} \left[A_0 \cdot e^{i k \frac{(x^2 + y^2)}{2z}} \cdot e^{-i k \frac{(x \cdot X + y \cdot Y)}{z}} \right] dX dY \quad (32).$$

Fraunhoferova aproximace spočívá v zanedbání členu $e^{i k \frac{(x^2 + y^2)}{2z}}$, pak lze difrakční integrál vyjádřit ve tvaru:

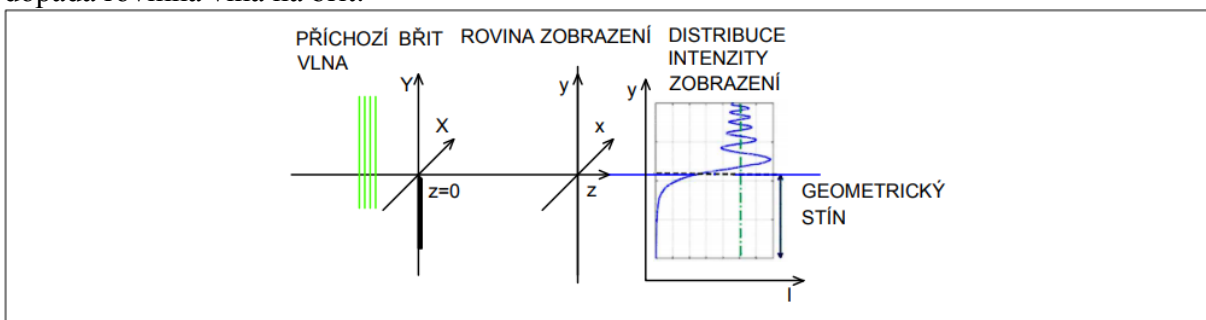
$$A_P \approx \frac{-i}{z \cdot \lambda} e^{i \cdot k \cdot z} \cdot e^{i \cdot k \cdot \frac{(x^2 + y^2)}{2z}} \iint_{S_A} \left[A_0 \cdot e^{-i \cdot k \cdot \frac{(x \cdot X + y \cdot Y)}{z}} \right] dX dY \quad (33).$$

Hranice pro Fresnelovu aproximaci (hranice použitelnosti Fraunhoferovi aproximace):

$$e^{i k \frac{(x^2 + y^2)}{2z}} \approx 1 \quad (34),$$

$$z \gg z_{mez} = \frac{k}{8} \cdot (S_A(X, Y))^2 \quad (35).$$

Pro podmínky (35) se volí největší rozměr otvoru. Nejrozšířenější filtr schlierového zobrazení je prostorový břit. Difrakce na břitu je z hlediska výpočtu netriviálních záležitostí. Jedná se o Fresnelovu difrakci, protože nad břitem lze uvažovat teoreticky nekonečnou polorovinu. Necht' dopadá rovinná vlna na břit:



Obr. 9. - Difrakce na břitu.

Pro výpočet situace znázorněné na obr. 9. je vhodné požit Fresnelovy integrály. Pro jejich vyjádření je výhodné zavést substitute:

$$\text{Substituce } x: \quad e^{ik\frac{x^2}{2z}} = e^{i\frac{\pi u^2}{2}}, \quad u = X \sqrt{\frac{2}{\lambda \cdot z}}, \quad du = dX \sqrt{\frac{2}{\lambda \cdot z}} \quad (36),$$

meze $\langle -\infty, \infty \rangle \sim \langle -\infty, \infty \rangle$

$$\text{Substituce } y: \quad e^{ik\frac{y^2}{2z}} = e^{i\frac{\pi v^2}{2}}, \quad v = Y \sqrt{\frac{2}{\lambda \cdot z}}, \quad dv = dY \sqrt{\frac{2}{\lambda \cdot z}} \quad (37),$$

meze $\langle Y_{B\check{R}IT}, \infty \rangle \sim \langle v_h, \infty \rangle$

Po substituci:

$$A_P \approx \frac{-i}{z \cdot \lambda} \cdot \frac{\lambda \cdot z}{2} \cdot A_0 \cdot e^{ikz} \cdot \int_{v_h}^{\infty} e^{i\frac{\pi v^2}{2}} dv \cdot \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\frac{\pi u^2}{2}} du \quad (38).$$

Fresnelovy integrály byly spočteny a tabelovány ve tvaru:

$$\mathcal{C}(x) = \int_0^x \cos\left(\frac{\pi}{2} \tau^2\right) d\tau \quad (39),$$

$$\mathcal{S}(x) = \int_0^x \sin\left(\frac{\pi}{2} \tau^2\right) d\tau \quad (40).$$

Zde x a τ jsou bezrozměrné reálné proměnné. Předmětem měření je intenzita světla dopadající do roviny zobrazení. Pro vyšetřovaný bod $P(x, y, z)$, pak aplikací Fresnelových integrálů:

$$A_P \cdot A_P^* = A_P^2 \left[(\mathcal{C}(u_1) - \mathcal{C}(u_2))^2 + (\mathcal{S}(u_1) - \mathcal{S}(u_2))^2 \right] \times \left[(\mathcal{C}(v_1) - \mathcal{C}(v_2))^2 + (\mathcal{S}(v_1) - \mathcal{S}(v_2))^2 \right] \quad (41).$$

Přičemž A_P^* je komplexně sdružená veličina k A_P . Grafickým vyjádřením je intenzita úměrná čtverci součinu vzdálenosti bodů v Cornuově spirále. Pro lepší názornost je někdy praktičtější zavedení rozložení relativní intenzity I_r , což je uvedeno v[47]:

$$I_r = A_P \cdot A_P^* \quad (42),$$

$$\frac{\Psi}{\Psi_r} = \sqrt{I_r} \cdot e^{i\varphi(xyz)} \quad (43),$$

zde Ψ_r je stav vlny, který by byl na stínítku ve vyšetřovaném bodě, pokud by nebyl v cestě vlny břit, φ je fáze vlny Ψ_r a Ψ je vlna difrakční.

Odtud lze vyvodit fázový skok difrakcí, plynoucí z teorie reflexe, jak uvádí [9], [79], [80].

Rovnici (43) lze přepsat ve tvaru:

$$\frac{\Psi}{\Psi_r} = \frac{-i}{2} \cdot \Psi_0 e^{ikz} \cdot \int_{v_H}^{\infty} e^{i\frac{\pi v^2}{2}} dv \cdot \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\frac{\pi u^2}{2}} du \quad (44).$$

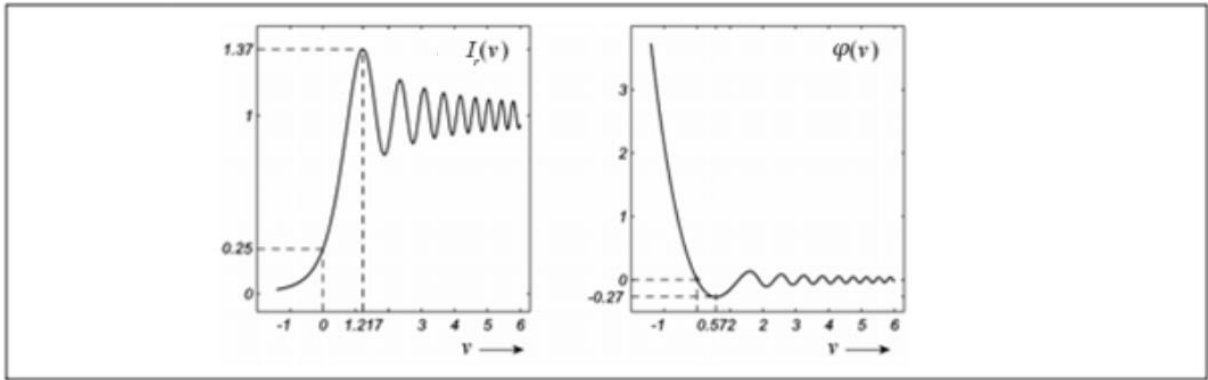
Pro relativní intenzitu I_r lze pomocí dosazení Fresnelových integrálů psát:

$$I_r(v) = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{2} \mathcal{C}(v) \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \mathcal{S}(v) \right)^2 \right] \quad (45).$$

A pro rozložení fáze φ lze pomocí výsledků Fresnelových integrálů vyjádřit:

$$\varphi(v) = \arctg \left(\frac{\frac{1}{2} + \mathcal{S}(v)}{\frac{1}{2} + \mathcal{C}(v)} \right) - \frac{\pi}{4} \quad (46).$$

Grafické vyjádření tohoto výsledku:



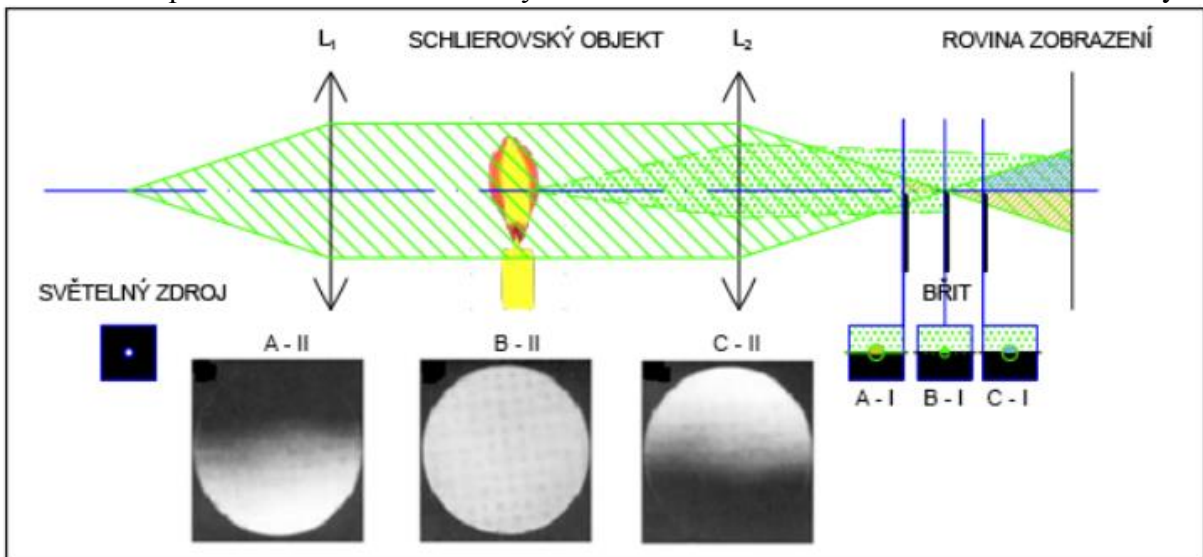
Obr. 10. - Relativní intenzita I_r a fázový posun φ při difrakci na hraně. Převzato z [47].

Na obr. 10. jsou relativní intenzita I_r a fázový posun φ difrakční vlny Ψ vztažené k neovlivněné vlně Ψ_r .

6.4.3 Jednoduchý prostorový břit a varianty uložení

Nejjednodušší prostorový filtr je realizovaný břitem. Jedná se o rovinnou překážku se zanedbatelným rozměrem v ose z . Ukládá se kolmo k ose z do prostoru fokusu neovlivněných paprsků procházejících detekční oblastí. V případě užití sestav s homogenními svazky v detekční oblasti je tento bod shodný s polohou ohniska zobrazovacího prvku za detekční oblastí, jak zmiňují Settles [74] a Soroko [79] a jak je patrné například na obr. 4 strana 11, nebo obr. 11 a dalších.

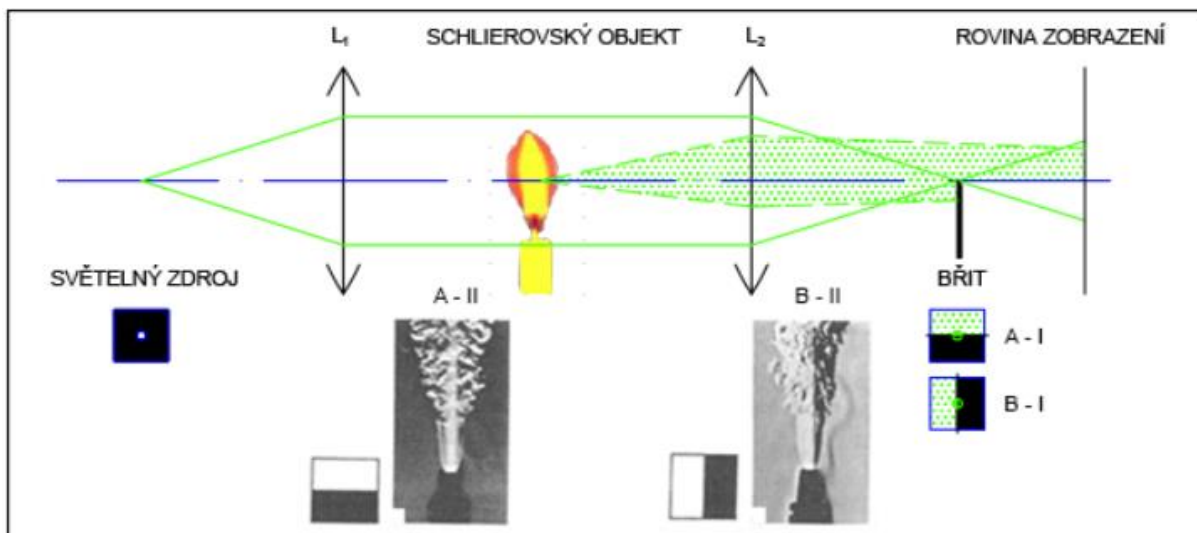
Poloha břitu v ose z musí být nastavena velmi přesně. V opačném případě dochází ke ztrátě informace, zhoršení citlivosti i kontrastu zobrazení a omezení detekčního pole. Příklady polohy břitu v okolí prostoru fokusu neovlivněných svazků za detekční oblastí břitu v ose z sestavy:



Obr. 11. - Možnosti umístění břitu v ose z zobrazovací sestavy:

A-I - břit před bodem fokusu neovlivněných paprsků; B-I - břit přesně v rovině fokusu neovlivněných paprsků; C-I - břit umístěn za prostor fokusu neovlivněných paprsků. A-II - zobrazení sestavou při A-I; B-II - brazení sestavou při B-I; C-II - brazení sestavou při C-I. Zobrazení A-C II bylo převzato z [74].

Břit může být uložen horizontálně nebo vertikálně. Uložení se volí podle povahy studovaného schlierovského objektu, eventuelně podle tvaru světelného zdroje



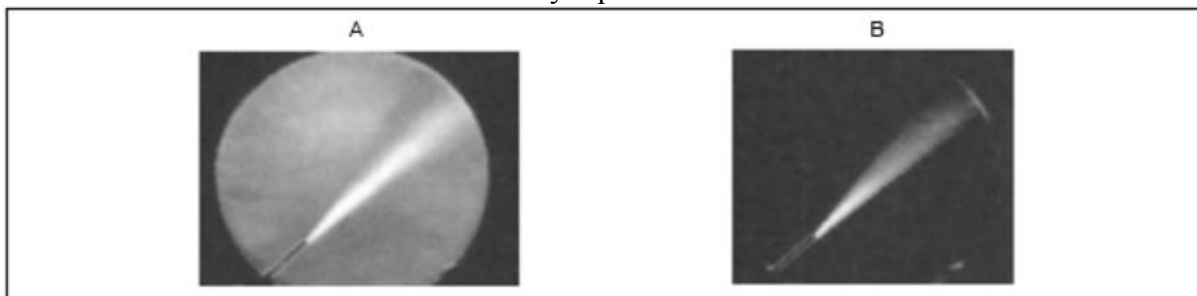
Obr. 12. - Sestava s vertikálním a horizontálním uložením jednoduchého břitu.

A-I - vertikálně (v ose y), B-I - horizontálně (v ose x); A-II - zobrazení acetylenového hořáku sestavou při A-I; B-II - zobrazení acetylenového hořáku sestavou při B-I. Zobrazení A-II, B-II bylo převzato z [74].

Na obr. 12. je břit umístěn v prostoru fokusu neovlivněných svazků za detekční oblasti.

6.4.4 Metody se světlym polem a temným polem

Základní rozdíl mezi oběma metodami je v tom, zda neovlivněné svazky paprsků ze zdroje projdou, nebo neprojdou na zobrazovací rovinu. Zacloněním části ovlivněných svazků prochází zároveň svazky neovlivněné a ta část svazků ovlivněných, která nebyla zacloněná. V obrazové rovině dochází k superpozici ovlivněných a neovlivněných svazků. Pozadí celé detekční oblasti je pak ozářeno neovlivněnými svazky, a v prostoru, kde pozorujeme obraz schlierovského objektu, dochází k nárůstu nebo poklesu intenzity. Hovoříme o metodě se světlym polem. Pokud cloníme svazky neovlivněné schlierovským objektem, pak na zobrazovací rovinu dopadají pouze svazky ovlivněné. Pozadí detekční oblasti je vlivem odclonění neovlivněných svazků tmavé a hovoříme o metodě s temným polem.



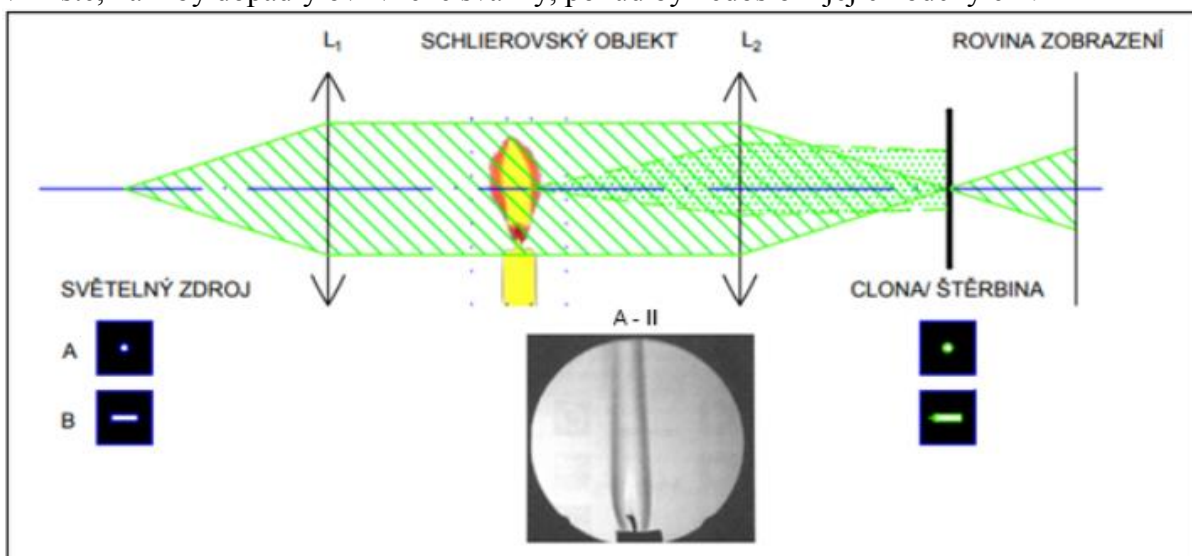
Obr. 13. - Zobrazení plynové trisky A - metodou světlého pole, B - metodou temného pole. Převzato z [74].

Metody se od sebe liší konstrukčně polohou a tvarem clony, nebo úrovní zaclonění břitem. Typické je použití clon tvaru a rozměru shodných se světelným zdrojem. Užívá se obvykle bílého či monochromatického nekoherentního světla. Metody s temným polem jsou nejčastěji používány v aplikacích barevné schlierové metody při použití barevných filtrů viz kapitola 6.4.6. Aplikace využívající metody temného pole mají podstatně vyšší úbytek intenzity detekovaného záření, a proto kladou vyšší požadavky na zobrazovací prostředky. Použitím břitu

v metodách s temným polem navíc ztrácíme značné množství informace o schlierovském objektu, protože břit je uložen tak, aby clonil 100 % neovlivněného záření zdroje.

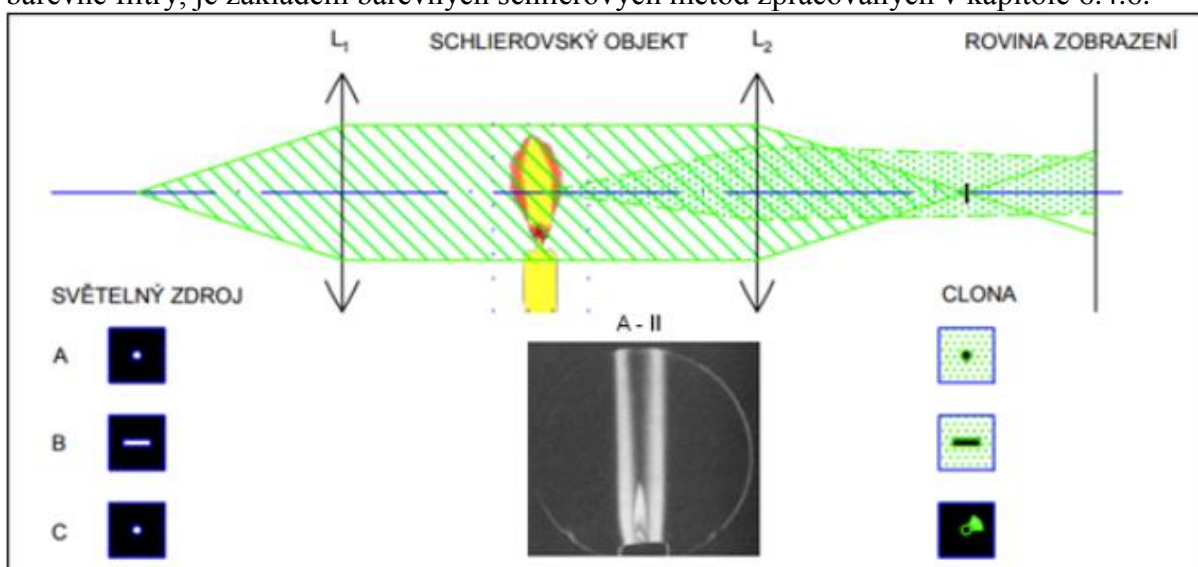
6.4.5 Prostorový břit realizovaný štěrbinou, kruhovou, nebo obdélníkovou clonou

Metody často využívají shodný rozměr světelného zdroje a clony, jak je popsáno v metodách světlého a temného pole v kapitole 6.4.4. Clony s otvorem o velikosti a tvaru světelného zdroje propouštějí téměř výhradně neovlivněný svazek, výsledkem je zobrazení metodou světlého pole, přičemž zaclonění odchýlených paprsků způsobí pokles intenzity ve výsledném zobrazení v místě, kam by dopadly ovlivněné svazky, pokud by nedošlo k jejich odchýlení.



Obr. 14. - Prostorových filtr realizovaný clonou a štěrbinou - zobrazení světlého pole
 A-I - kruhový tvar zdroje a clony; B-I - obdélníkový tvar zdroje a štěrbinu; A-II - příklad zobrazení svíčky touto metodou, převzato z [74]; (případ světlého pole - viz kapitola 5.4.4).

Je možné realizovat také clonu inverzní k předchozímu případu. Taková sestava využívá metodu zobrazení temného pole, přičemž cloní neovlivněné svazky. Tento princip, doplněný o barevné filtry, je základem barevných schlierových metod zpracovaných v kapitole 6.4.6.



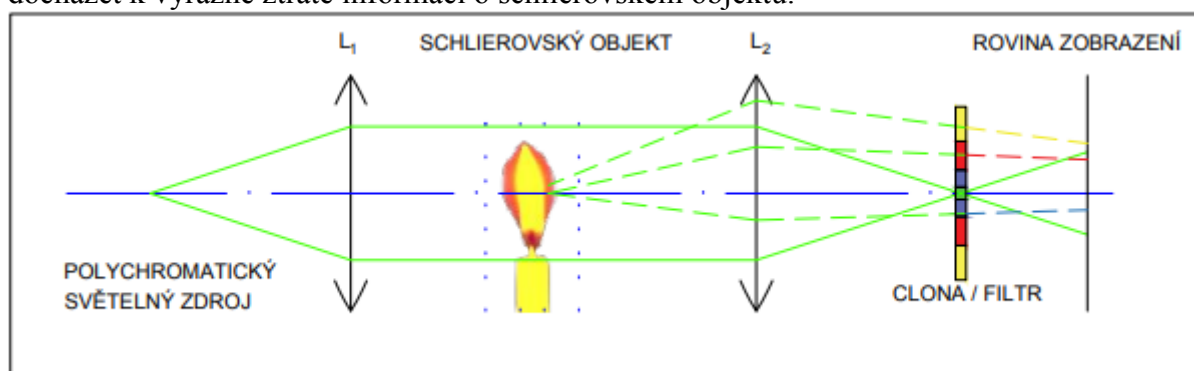
Obr. 15. - Prostorových filtr realizovaný clonou a štěrbinou - zobrazení temného pole

A - kruhový tvar zdroje a kruhová clona shodného rozměru, obdélníkový B - tvar zdroje a obdélníková clona shodného rozměru, C - kruhový tvar zdroje a clona propouštějící světlo kruhovou výsečí mimo projekci zdroje ; A-II - příklad zobezení svíčky touto metodou, převzato z [74]; (případ temného pole - viz kapitola 5.4.4).

Obr. 15 - C - toto řešení se používá často v teleskopech a při pozorování schlierovských objektů v atmosféře pomocí teleskopu, přičemž jako zdroj světla slouží slunce, což bude rozvedeno v kapitole 6.8.7 Schlierové zobrazení teleskopem na straně 45.

6.4.6 Prostorové filtry pro barevné metody schlierovského zobrazení a částečnou kvantifikaci

Barevné metody umožňují určitou míru kvantifikace a zlepšují představu o prostorovém rozložení nehomogenit indexu lomu. Jsou ale na realizaci náročnější, často méně citlivé a může docházet k výrazné ztrátě informací o schlierovském objektu.















Obr. 16. - Znárodnění trasování paprsků při použití barevného filtru.

Na obr. 16. je barevný filtr rozdělen na sekce, v závislosti na úhlu odchýlení ovlivněného paprsku může procházet různými barevnými sekcemi a do zobrazovací roviny dopadnou paprsky různých vlnových délek v závislosti na barvě sekce filtru, kterou prošly (v závislosti na úhlu odchýlení schlierovským objektem).

6.4.6.1 1d (metody kvantifikace v jedné rovině kolmé k rovině xy)



Metody tohoto typu barevně rozlišují intervaly odchýlení paprsků pouze v jedné ose (v jednom směru, rovině kolmé k rovině xy). Jsou založeny typicky na barevných filtrech uložených v jednom směru. Tyto metody jsou citlivé na vlastnosti objektu v jednom směru a částečně kvantifikují vlastnosti schlierovského objektu (v rozmezí intervalů úhlu odchýlení ε) na základě rozměrů a poloh barevných filtrů. Rozměr i parametry případných netransparentních částí filtru se s výhodou přizpůsobují měřenému objektu. Tento způsob zobrazování je velmi vhodný pro popis vlastností rázových vln a rovinných objektů s výrazným gradientem indexu lomu. Jak zmiňuje Stevenson ve své práci [82], H. Kleine, metodu použil k určení gradientu hustoty, přičemž filtr musel nechat rotovat kolem osy z soustavy k získání kvalitních kvantitativních měření (při použití kruhového bodového světelného zdroje). Metoda byla citlivá nejen na hodnotu, ale i směr gradientu indexu lomu. Dalšími autory zpracovávajícími měření touto metodou byli například Ibaretta a Sung [51], Leptuch a Agrawal 2003 [56] a další. Metoda je populární pro zobrazování oscilací výtoku trysky, nebo tepelnou analýzu plazmatu. Informace o objektu je zaznamenávána pomocí barevných odstínů ve výsledném zobrazení.

POLYCHROMATICKÝ SVĚTELNÝ ZDROJ		CLONA / FILTR		
	A	Shardin	1942 [12]	
	B	Shardin	1942 [1]	
	C	Norath	1954 [1]	
	D	Jeffere	1956 [1]	
	E	Jeffere	1956 [1]	
	F	Norath & Cash	1959 [1]	

Obr. 17. - Světelné zdroje a barevné filtry citlivé na gradient indexu lomu v jednom směru. Uveden autor, rok publikování a informační zdroj.

6.4.6.2 2d (metody kvantifikace ve všech rovinách kolmých k rovině xy současně)

Obdobný přístup k analýze schlierovského objektu jako předchozí metoda (6.4.6.1) má také metoda barevného terče (anglicky „Bulls eye“ [82]). Opět je informace o předmětu získána analýzou barevných odstínů. Touto metodou získaná data poskytují informaci v cylindrických souřadnicích. Kvantifikace dat má nižší přesnost, ale metoda měří ve všech směrech (rovinách kolmých k rovině xy) současně. Je jasné, že metoda nerozlišuje směr gradientu indexu lomu, na rozdíl od předchozí metody. Tento nedostatek, jak zmiňuje [74], řešil ve svém díle již Walter (1950), použitím dvojlomného krystalu a zkřížených polarizací, s následnou analýzou pomocí polarizátoru. Tento typ filtru se užíval zejména pro popis vlastností plamene ve spalovací komoře například D. Stevenson [82].











POLYCHROMATICKÝ SVĚTELNÝ ZDROJ		CLONA / FILTR		
	A	Rheinberg	1896 [1]	
	B	Walter	1950 [1,12]	
	C	Seltz	1992 [1]	
	D	Rheinberg	1896 [1]	
	E	Wuest	1967 [1]	

Obr. 18. - Světelné zdroje a barevné filtry citlivé na gradient indexu lomu ve více směrech. Uveden autor, rok publikování a informační zdroj.

6.4.6.3 Metody s barevnou maskou světelného zdroje

K řešení problému částečné kvantifikace objektu pomocí vzniku barevného obrazu vlivem odlišného trasování paprsků přistoupili někteří autoři i ze strany vytvoření zdrojů s velmi přesným, často komplikovaným, geometrickým tvarem a barevnými filtry. Pak se clona realizuje, bez barevných filtrů. Tento přístup je komplikovanější na realizaci a používá se

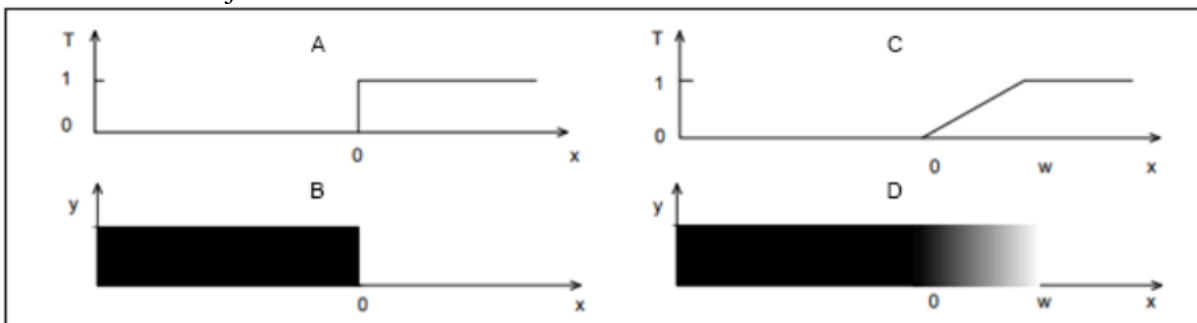
omezeně. Často se podoba zdroje a clony navrhuje individuálně k řešení konkrétního problému. Proto pro ilustraci uvádím pouze několik častěji používaných variant.

POLYCHROMATICKÝ SVĚTELNÝ ZDROJ		CLONA / FILTR		
	A	Jeffree	1956 [1]	
	B	Seitz	1992 [1]	
	C	Settles	1980 [1]	
	D	Jeffere	1956 [1]	
	E	Kleine	1993 [1]	

Obr. 19. - Světelné zdroje s barevnou maskou a clony / filtry. V prostoru clony zeleně vyznačena poloha obrazu zdroje. Uveden autor, rok publikování a informační zdroj.

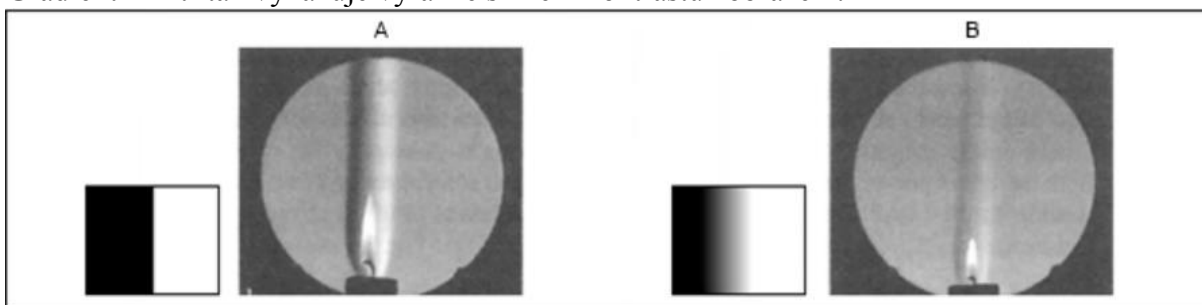
6.4.7 Prostorový břit realizovaný gradientním filtrem

Základní výhodou použití gradientního filtru je potlačení difrakcí na břitu. Užití gradientního filtru však zhoršuje kontrast zobrazení.



Obr. 20. - Prostorový břit a gradientní filtr. A, C - transmise T v závislosti na geometrii použitého prostorového, vertikálně uloženého břitu, B, D - prostorový filtr realizován jednoduchým prostorovým břitem (B), gradientním filtrem (D). Uvedeno v [74], [87].

Gradientní filtr tak vykazuje výrazné snížení kontrastu zobrazení.



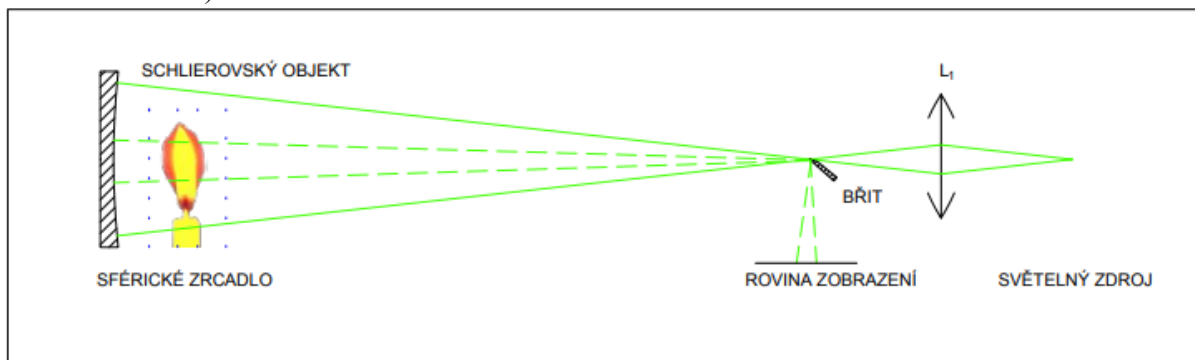
Obr. 21. - Zobrazení prostorovým břitem a gradientním filtrem. Schlierové zobrazení plamene svíčky pořízené pomocí A - břitu; B - gradientního filtru. Převzato z [74].

G. Settles [74] uvádí výpočet nejmenšího detekovatelného úhlu pro gradientní filtr šířky w :

$$\varepsilon_{min} = \frac{10313 \cdot w}{f} \text{ (arcs)} \quad (47).$$

6.4.8 Polopropustné, reflexní a částečně reflexní prostorové bříty

Jedná se o bříty realizované tak, že v ohnisku zobrazení se umístí odrazný prvek, který část ovlivněných svazků odchýlí. Tyto odchýlené svazky se dále zobrazují a poskytují informaci o objektu (jedná se o metodu temného pole, protože neovlivněné svazky nejsou odchýleny do detekční oblasti).



Obr. 22. - Sestava s reflexním břitem umístěným v bodu fokusu neovlivněných svazků. Sestava byla popsána v [74].

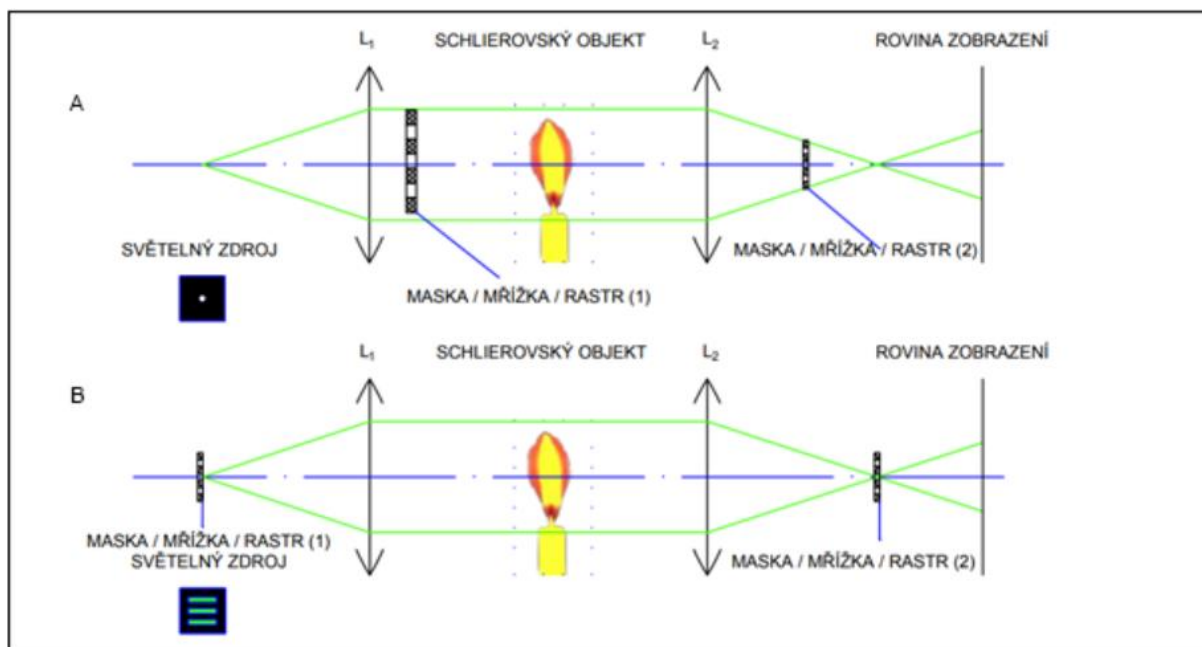
Na obr. 22. je břit umístěn tak, aby neovlivněné svazky procházely beze změny, ale část ovlivněných svazků byla odražena do roviny zobrazení mimo optickou osu.

Tento způsob filtrace není příliš běžný. V případě požadavků na detekci mimo rovinu mezi zdrojem a objektem je výhodnější před ohnisko umístit dělič svazku a břit/filtr umístit do ohniska až v zobrazovací větvi, nicméně varianta s děličem svazku vykazuje vyšší ztrátu intenzity světla ve výsledném zobrazení vlivem dvojího průchodu děličem svazku.

6.4.9 Prostorové filtry metod orientovaných na pozadí

V literatuře se setkáme často se zkratkou BOS (Background Orientated Schlieren metod), nebo s označením schlierové moaré techniky odkazující na použití rastru. Tyto metody bývají využívány zejména pro zobrazování velkých ploch. Pozadí se sestává z rastru a břit je typicky k tomuto rastru komplementární. Běžné konstrukční řešení pak rastrový břit umísťuje před fokus zobrazení objektivem (čočkou) L_2 .

Na obr. 23. - A je zobrazení situace při použití dvou rastrů při schlierové metodě orientované na pozadí. Filtr (RASTR 2) musí korespondovat s tvarem rastru pozadí (RASTR 1) a to v příslušném měřítku. Rastr může být identický nebo komplementární. Umístění detekčního rastru před fokus svazků za objektivem (čočkou) L_2 je obvyklým způsobem sestavení, zejména při umístění rastru pozadí do prostoru kolimovaných svazků. Na obr. 23. - B je Rastr 1 přímo světelným zdrojem. Rastr 2 se nachází v ohnisku soustavy a je komplementární nebo identický s rastru 1. Používá se zejména v aplikacích vyžadujících vyšší citlivost při užití menšího pole. Dnes se jedná o často používanou metodu, obvykle koncipovanou jako metoda se světlým polem nebo v barevných aplikacích.



Obr. 23. - Použití dvou rastrů při schlierové metodě orientované na pozadí.

MASKA/MŘÍŽKA/RASTR (1) - rastr, mřížka, nebo masky vytvářející specifické pozadí detekční oblasti; MASKA/MŘÍŽKA/RASTR (2) - filtr zobrazení. Situace je popsána například v [74], [30].

6.5 Činnost fázového filtru při realizaci schlierových metod zobrazení

Fázový filtr, nebo také “fázový břit” využívá interference pro zviditelnění fázového rozdílu. Průchodem nehomogenním objektem vzniká dráhový, tedy i fázový rozdíl paprsků. Fázově posunutá paprsky interferují a vytváří interferenční obrazce. Poloha interferenčních maxim a minim tohoto obrazce koresponduje s rozdíly indexů lomu ve zkoumaném nehomogenním prostředí. Využití tohoto typu filtrů má jasné výhody oproti filtrům prostorovým, jako absence difrakčních jevů na břitě, které zhoršují parametry zobrazení, nebo jednodušší zpracování výsledků do kvantitativního měření i výrazné zlepšení kontrastu zobrazení. Nevýhodou je náročná justáž, vyžadující velké úsilí, přesnost a pečlivost, malý rozměr použitelných prvků a z toho plynoucí komplikovanost realizovaných soustav, malý rozměr detekčního pole, nebo nutnost použít koherentní světelné zdroje. Je nutné zmínit, že někteří autoři se vyhýbají označení metod využívajících fázového filtru a interference za schlierové metody a souhrnně tyto metody řadí k metodám interferenčním, protože dochází k interferenci a ne k odclonění části paprsků procházejících filtrem, či břitě. Příkladem je práce autorů Zhai D., Chen S., Yin Z. a Li S. [98]. Jiní autoři, jako například Settles [74], zdůrazňují, že schlierové zobrazení je takové, při kterém je podstatou metody clonění či separace paprsků odchýlených od původního směru vlivem vnějšího fyzikálního působení schlierovského objektu. Tyto odchýlené paprsky mohou splňovat podmínky pro vznik interference J. Sequens [72]. Mezi schlierové metody neřadí ty metody využívající jiný způsob vzniku fázového rozdílu mezi interferujícími svazky, například posunutím trajektorie vlny, které jsou často, označeny za střížný interferometr. Střížný interferometr řadí pouze do zobrazení projevů schlier a mezi speciální případ interferenčních metod například autoři Biss M. M. a kol. [7], Soroko L. M. [81] a další [74], [52], [98], [97]. Autoři připouštějí, že se jedná o zobrazovací techniku podobnou schlierovému zobrazování, ale mají snahu tuto metodu vyčlenit, protože nepracuje s úhlem odchýlení ovlivněných svazků na schlierovském objektu. Jiní autoři, například autoři Smeets G., George A. [77], [76] Debrus S. a kol. [17] a Hugenschmidt M. [41] zařazují tuto metodu přímo do

schlierových metod zobrazení. V literatuře jsou tyto metody pak často označovány jako “schlierové interferenční metody”, nebo “schlierová interferometrie”.

Poměrně časté jsou v literatuře i případy, kdy se autoři vůbec nevyjadřují k otázce, mají-li být techniky a metody využívající diferenciální střížný interferometr začleněny mezi techniky schlierového zobrazení, či nikoli. To je případ například prací od Desseho J. M. a Olchewskyho F. [20], Lawsona J. M. a kol. [52] a Ceruzziho A. a Cadou Ch. P. [13].

Pro účely této práce vyjdeme z předpokladu, že se jedná o schlierovou metodu zobrazení v případě, kdy došlo vlivem fyzikálního působení schlierovského objektu k odchýlení ovlivněného paprsku o úhel ε od původního směru šíření.

6.5.1 Principy vzniku fázového rozdílu v detekční oblasti

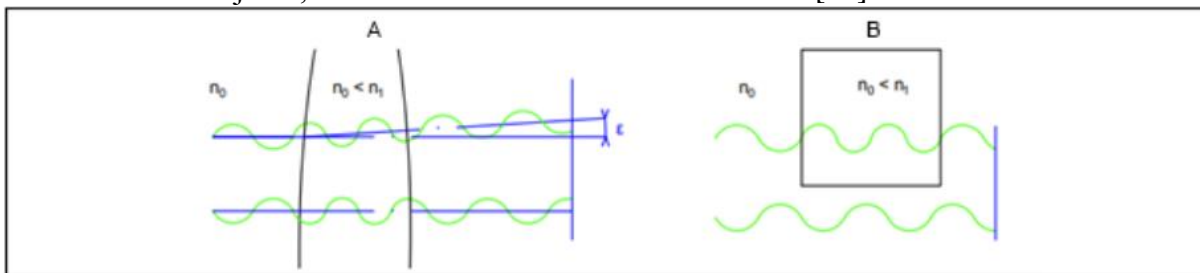
- Odchýlení paprsku

Svazky mohou získat vzájemný fázový rozdíl, který se projeví při interferenci v detekční oblasti odchýlením paprsku o úhel ε . Paprsky, které spolu budou interferovat, tak získají fázový rozdíl vlivem odlišné délky trajektorie mezi schlierovským objektem a rovinou zobrazení. Situace je znázorněna na obr. 24. - A. Směr šíření svazků se musí vhodnou optickou soustavou upravit tak, aby mohlo dojít k interferenci.

- Rozdíl optických drah

Fázový rozdíl mezi dvěma paprsky může vzniknout tak, že se jeden paprsek pohybuje prostředím s odlišným indexem lomu. V tomto případě vzniká fázový rozdíl mezi oběma paprsky, ale nemusí dojít ke změně směru šíření. Situace je znázorněna na obr. 24. - B.

Zobrazování v důsledku tak vzniklého fázového rozdílu je běžně označováno jako schlierová interferometrie, někdy také hovoříme o střížovém interferometru. Střížový interferometr bude popsán v kapitole 6.5.4 na straně 27. Jedná se o metodu často využívanou, zejména v průmyslu, nebo mikroskopii. Jedná se spíše o interferometrickou metodu zobrazující vlastnosti schlierovského objektu, než-li o schlierovou metodu zobrazení [74].



Obr. 24. - Vznik fázového rozdílu.

A - Znázorněn vznik fázového posunu vlivem změny směru šíření paprsku. Paprsek změnil směr při průchodu oblastí s odlišným indexem lomu. B - Znázornění vzniku fázového posunu mezi dvěma paprsky vlivem průchodu jednoho paprsku prostředím s odlišným indexem lomu, v tomto případě opticky hustším prostředím.

- Rozdíl optických drah průchodem dvojlomou látkou

Průchodem ordinerního a extraordinerního svazku dvojlomou látkou mezi nimi vzniká rozdíl optických drah

$$\Delta s = dn_{ord} - dn_{ext} \quad (48).$$

Kde n_{ord} - index lomu ordinerního svazku, n_{ext} - index lomu extraordinerního svazku, s dráha. Z pro vlnovou délku λ je možno odvodit pro fázový rozdíl $\Delta\varphi$:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi \cdot d (n_{ord} - n_{ext})}{\lambda} \quad (49).$$

Fázové filtry mohou vyhodnocovat také difrakční jevy a interference na tenkých vrstvách, což J. Sequens [72] označuje souhrnně jako interference na hranách schlier. Problematice využití

difrakčních jevů na schlierách se věnuje také L. A. Vasilev [90], který zmiňuje, že je obvyklé difrakční jevy vznikající na schlierách spíše potlačovat, protože snižují citlivost sestavy při použití sestavy jako střížného interferometru, ale připouští jejich využití při kvalitativním i kvantitativním vyhodnocení, pokud se použítá metoda zaměřuje na jejich detekci. Při kvantitativním měření je popis jevů v detekční oblasti komplikovaný a validní data je nutno získat porovnáním měření a teoretického modelu.

6.5.2 Citlivost fázového filtru v sestavě

L. A. Vasilev [90] demonstuje odvození fázové citlivosti. Pro intenzitu osvětlení v záznamu platí:

$$E = 1 + \frac{1}{t_\lambda} + \frac{1}{p_\lambda} - \frac{2 \cos(\Delta\varphi)}{\sqrt{p_\lambda}} - \frac{2 \cos \varepsilon'}{\sqrt{t_\lambda}} - \frac{2 \cos(\Delta\varphi - \varepsilon')}{\sqrt{p_\lambda \cdot t_\lambda}} \quad (50),$$

kde E - intenzita osvětlení, t_λ - transmisní funkce fázového filtru, p_λ - pokles amplitudy vstupní vlny průchodem vlny skrze fázový filtr, $\Delta\varphi$ - fázový posuv, ε' - úhel který svírají interferující vlny. Pro objekty se zanedbatelným stáčením roviny polarizace je možné aproximovat $t_\lambda = 1$. Z rozložení intenzity v interferenčním obrazci je možné určit fázovou citlivost metody:

$$S_{fáz} = 2 \cdot \left(\sin \theta + \frac{2 \sin(\Delta\varphi - \varepsilon')}{\sqrt{p_\lambda}} \right) \quad (51),$$

kde θ - vzájemný úhel obou interferujících vln. Při zavedení aproximace, že vzájemný úhel obou interferujících vln θ je velmi malý, lze zjednodušit vztah pro výpočet fázové citlivosti na:

$$S_{fáz} = \frac{2 \sin(\Delta\varphi)}{\sqrt{p_\lambda}} \quad (52).$$

6.5.3 Srovnání činnosti prostorového filtru (břítu) a fázového filtru

- Prostorový břit

Pracuje na principu rozlišování ovlivněných a neovlivněných (odchýlených a neodchýlených) svazků. Prostorově je oddělí vhodně umístěnou clonou. Obraz na záznamovém médiu je tvořen světlejšími a tmavšími oblastmi. Toto rozdělení odpovídá pozitivnímu a negativnímu gradientu indexu lomu ve směru kolmého na břit. Pro maximum intenzity zobrazení platí:

$$I = I_1 + I_2 \quad (53).$$

Zde I - intenzita výsledné superpozice I_1 I_2 - intenzity interagujících záření přičemž jeden je paprsek ovlivněný a druhý paprsek neovlivněný, Tedy maximální intenzita může být až dvojnásobná v místě superpozice neovlivněného a ovlivněného paprsku. Jedná se o limitující faktor metod s prostorovým břitem. Prostorový filtr (zejména realizovaný břitem) je vhodný pro kvalitativní měření všech schlierových objektů, bez ohledu na rozsah gradientu indexu lomu, pokud není pod limity citlivosti. Nespornou výhodou použití prostorového filtru, například břítu, je možnost přímého určení směru gradientu indexu lomu. Použití prostorového břítu je technicky i konstrukčně nejjednodušší a cenově dostupné.

- Fázový filtr

Vyhodnocuje fázový rozdíl pomocí interference. Poloha sousedních maxim interference Δx :

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2 \sin\left(\frac{\varepsilon'}{2}\right)} \quad (54).$$

Zde Δx je poloha dvou sousedních interferenčních maxim. Odtud je patrné, že šířka interferenčních proužků závisí na vlnové délce λ a nepřímo úměrně sinu úhlu, jež interferující vlny svírají. Touto úvahou je možné získat kvantitativní měření. Na Wollastonově hranolu nedochází k difrakčním jevům, jako na břítu. Z toho důvodu je možné říci, že tento typ

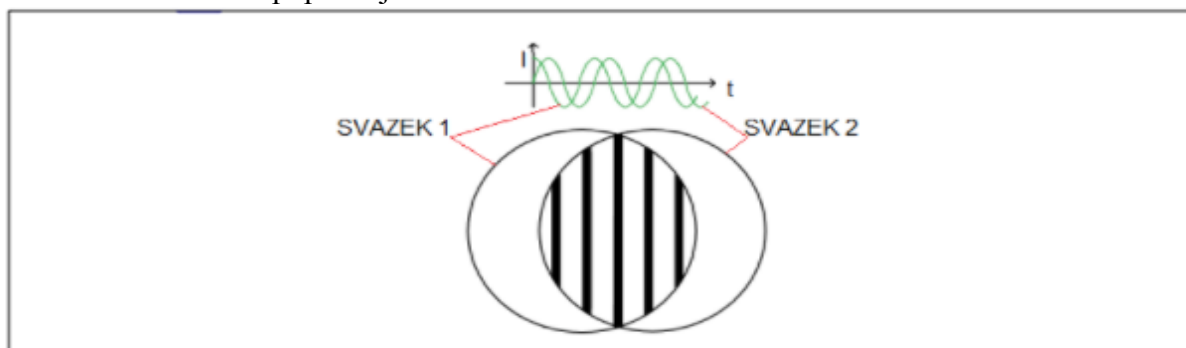
schlierovského filtru není zatížen difrakčními limity. Pokud je ale v detekční oblasti objekt, na němž dochází k výrazným projevům difrakce, budou tyto projevy také ve výsledném zobrazení patrné. Pro výslednou intenzitu vlnění o shodné amplitudě lze psát:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 + I_2} \cdot \cos(\Delta\varphi) \quad (55).$$

Zde I - intenzita ve vyšetřovaném bodě interferenčního obrazce, I_1, I_2 intenzita interferujících paprsků paprsku, $\Delta\varphi$ - fázový rozdíl. Je zřejmé, že maximální intenzita ve výsledném zobrazení je čtyřnásobná v místě interferenčního maxima. Protože citlivost závisí na intenzitě, jedná se o limitující faktor schlierových metod. Použití tohoto typu filtru také vykazuje lepší kontrast zobrazení vlivem periodické struktury interferenčních proužků. Z předložených důvodů i značné variability metod s fázovým filtrem může být dosaženo vyšší citlivosti. Použití tohoto filtru v sestavě je však vhodné pouze pro schlierové objekty v určitém rozsahu gradientu indexu lomu, což je nutné zohlednit při návrhu a konstrukci. Pořízení některých prvků (Wollastonův hranol a podobně) může být nákladné a značné jsou i nároky na kvalitu zobrazovacích prvků. Konstrukčně se jedná o náročnější variantu a justáž sestavy vyžaduje velkou pečlivost a přesnost. Nicméně tento typ schlierových filtrů poskytuje interferenční zobrazení schlierového objektu a možnost kvantifikace dat. [49]

6.5.4 Fázový filtr tvořený diferenciálním (střížným) interferometrem

Nejčastěji se pro střížný interferometr používá laserového světelného zdroje a paprsky v detekční oblasti bývají kolimované, nebo fokusované - LDI Laser Differential Interferometer, FLDI Focused Laser Differential Interferometer. Využívá se rozdělení jednoho svazku na dva, například Wollastonovým hranolem, který vzájemně odchýlí ordinerní a extraordinární svazky. Činnost Wollastonova hranolu bude rozvedena v kapitole 6.5.6. Průchodem jednoho svazku schlierovským objektem dojde k fázovému posunu vlivem průchodu odlišným optickým prostředím. V případě běžného interferometru by druhý svazek byl referenční, veden tak, aby nebyl ovlivněn (vyhodnocujeme přímo hodnotu indexu lomu vztaženou k okolnímu prostředí) V případě střížového interferometru je posunut o stanovenou vzdálenost a směr od svazku prvního (čímž vyhodnocuje gradient indexu lomu schlierovského objektu na této předem stanovené vzdálenosti a směru). V závislosti na zvolené sestavě aplikujeme stříh pootočením, nebo posunutím. Po následné interferenci obou svazků se vyhodnocují projevy změny v optické dráze na interferogramu a je možné získat informaci o gradientu. Tímto způsobem je možné získat i kvantitativní popis objektu.

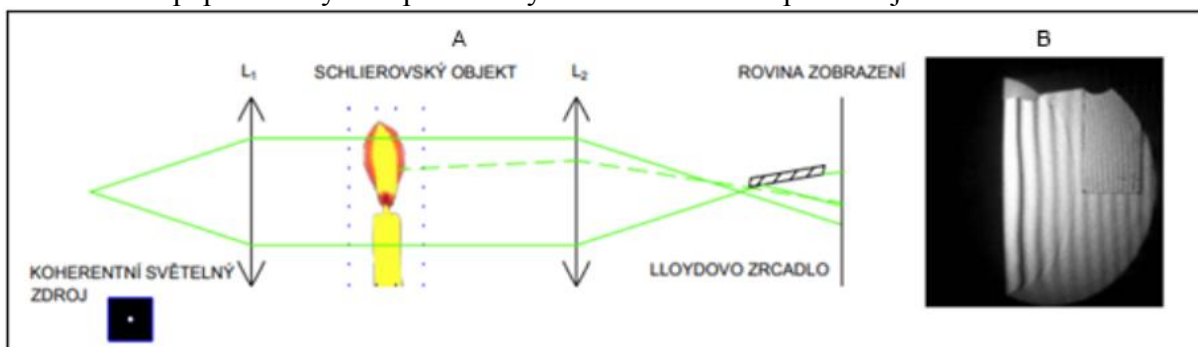


Obr. 25. - Znárodnění interference neovlivněných svazků střížného interferometru.

6.5.5 Fázový filtr tvořený Lloydovým zrcadlem

Jedná se o interferometr, který úspěšně vyšetřuje tenké schlierovské objekty s velkým fázovým rozdílem. Lloydův zrcadlový interferometr vytváří virtuální (referenční) světelný zdroj na základě difrakce na čelní hraně zrcátka. Amplituda světla rozptýleného od přední hrany zrcadla je dostatečná pro vytvoření interference v rovině zobrazení. [49] Může vyšetřovat na principu

interferenčního pozadí, přičemž světelným zdrojem reference je první difrakční maximum vznikající na hraně zrcátka, jak je demonstrováno na obr. 27 - A a zmíněno v článku od autora Kumar R. [49]. Hlavní nevýhodou je požadavek na prostorové oddělení paprsku objektu a referenčního paprsku a vysoké požadavky na kvalitu i velmi přesnou justáž.



Obr. 26. - Sestava s fázovým břítem tvořeným Lloydovým zrcadlem.

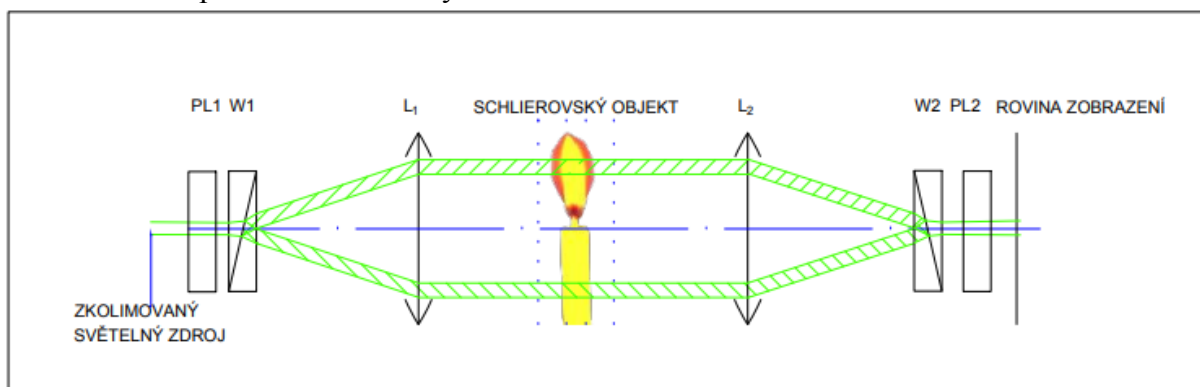
A - sestavení prvků s fázovým břítem tvořeným; B - zobrazení měření převzaté z [49].

6.5.6 Fázový filtr realizovaný Wollastonovými hranoly - obecné poznatky

Poznatky o vlastnostech a využití Wollastonova hranolu se opírají zejména o publikace [7], [9], [11], [19], [52], [76], [77], [80], [81], [87], [90], [92], [97], [98]. Fázový filtr může s využitím vlastností dvoulomých hranolů. Činnost Wollastonova hranolu bude podrobněji popsána na příkladu sestavy se dvěma Wollastonovými hranoly a dvěma lineárními polarizátory v kapitole 6.5.6.1. Wollastonův hranol vytvořil roku 1820 W. H. Wollaston a dnes je nejvíce používán v interferometrech. Wollastonův hranol se skládá z dvojice pravouhlých dvoulomých krystalů, jejichž orientace je taková, že optické osy obou prostředí jsou navzájem kolmé. Po dopadu jednoho světelného svazku rozdělí Wollastonův hranol svazek na dva světelné svazky vzájemně kolmo polarizovaných vln, odchýlených od přímočarého směru šíření o shodný deviační úhel. Podobně se v diferenciálních interferometrech využívá Sandersonův nebo Nomarského hranol. Diferenciální filtr s Wollastonovým hranolem pak využívá nastíněné rozdělení světelného svazku, nebo zpětného sloučení svazků kolmých, vstupujících do Wollastonova hranolu pod vzájemným úhlem δ (dvojnásobkem deviačního úhlu). V praxi se tento typ filtru realizuje v sestavách s jedním či dvěma Wollastonovými hranoly a jejich modifikacemi.

6.5.6.1 Fázový filtr v sestavě se dvěma Wollastonovými hranoly a lineárními polarizátory

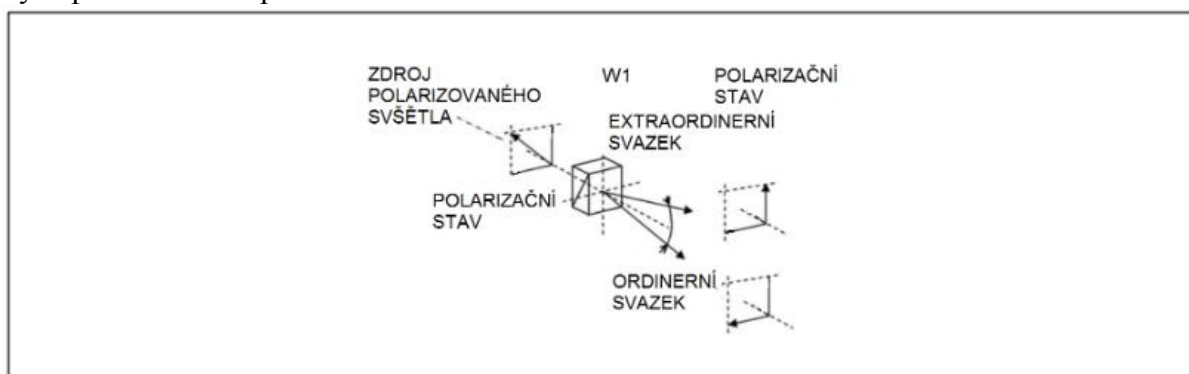
Využití dvou identických Wollastonových hranolů pro schlierové zobrazení s fázovým filtrem lze realizovat způsobem naznačeným na obr. 27.



Obr. 27. - Znárodnění základní sestavy s využitím dvou Wollastonových hranolů.

Sestava využívá dvou Wollastonových hranolů a dvou lineárních polarizátorů PL1 - lineární polarizátor 1 s rovinou polarizace stočenou o 45° k polarizačním rovinám Wollastonova hranolu W1; W1 - Wollastonův hranol před detekční oblastí; L_1 , L_2 - spojné objektivy (čočky) upravující chod ordinerního i extraordinerního svazku; W2 - výstupní Wollastonův hranol měnící směr šíření ordinerního i extraordinerního svazku; PL2 - lineární polarizátor s rovinou polarizace stočenou o 45° k rovinám polarizace Wollastonova hranolu W2. Sestava byla komentována například v [74], [77], [90], [41], [18], [76].

Na obr. 27 se první Wollastonův hranol (W1) umístí před čočkou L_1 a nasvítí se koherentním lineárně polarizovaným světlem, jehož rovina polarizace je skloněna o 45° vzhledem k výstupním rovinám polarizace W1.

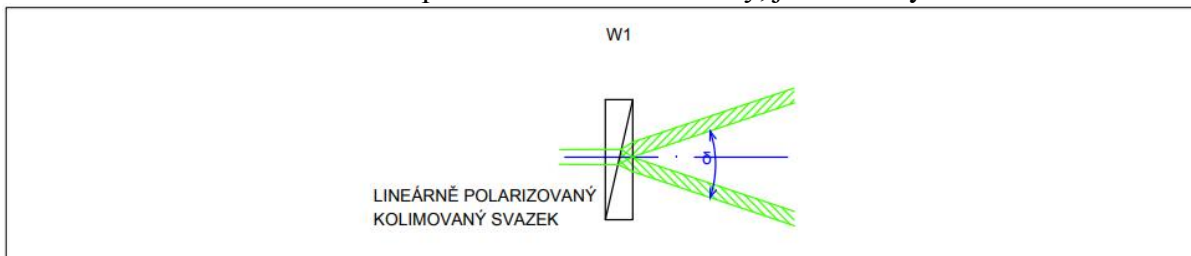


Obr. 28. - Popis činnosti Wollastonova hranolu.

W1 - Wollastonův hranol. Převzato z [19].

Na obr. 28. je znázorněn polarizační stav vstupujícího svazku a vystupujících svazků. Hranol W1 rozdělí vstupující svazek na dva vzájemně kolmo lineárně polarizované komplementární svazky o stejné intenzitě odchýlené od osy soustavy o shodný úhel. Oba tyto svazky pak projdou detekční oblastí, kde získají, nebo nezískají vzájemný fázový rozdíl v závislosti na trajektorii v detekční oblasti, poloze a tvaru objektu a rozložení oblastí gradientu indexu lomu. Za detekční oblastí jsou objektivem všechny svazky fokusovány do druhého Wollastonova hranolu (W2). Za W2 musí být umístěn výstupní polarizátor. Po průchodu polarizátorem v rovině zobrazení pak obě komplementární pole destruktivně interferují. Pokud ale získaly vhodný dráhový rozdíl průchodem schlierovským objektem, bude jejich interference konstruktivní, a v rovině zobrazení se objeví interferenční proužky, nesoucí informaci o gradientu indexu lomu mezi

dvěma oblastmi vzorku, jak uvádí Lawson J. M. a kol. [52]. Vzdálenost těchto oblastí je dána vzájemnou pozicí obou svazků procházejících vzorkem. Tento způsob detekce bývá označován jako střížný interferometr (jak bylo uvedeno v kapitole 6.5.4 na straně 28). Další možností je superpozice interferencí na hranách schlier [72], které se projeví v každém svazku, vystupujícím z detekčního Wollastonova hranolu, v této kapitole označovaným W2. Polarizátor, který se umísťuje před rovinu zobrazení (se zobrazovacím prvkem), zlepšuje kontrast zobrazení a umožňuje optimalizaci nastavení příspěvku intenzity z obou svazků. Na Wollastonův hranol může dopadat svazek zkolimovaný, jak tomu bylo v sestavě na obr. 27.

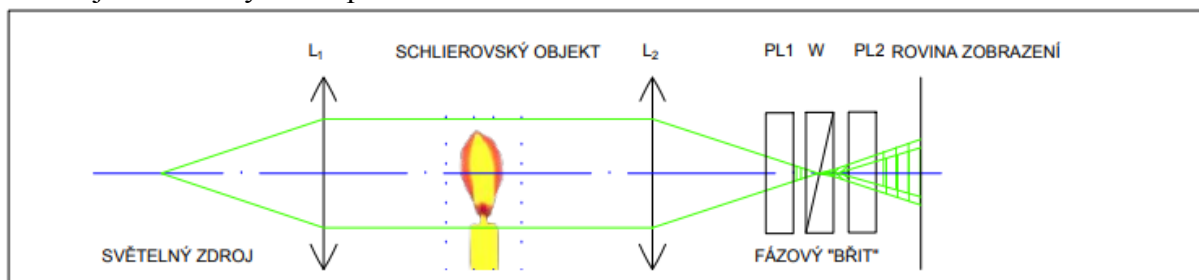


Obr. 29. - Symbolické znázornění chodu kolimovaných paprsků Wollastonovým hranolem. W1 - Wollastonův hranol; δ - separační úhel ordinerního a extraordinerního svazku.

Často se ale využívá také průchodu fokusovaného svazku Wollastonovým hranolem. Užití fokusovaných svazků dopadajících na Wollastonův hranol je v praxi poměrně časté a jako příklad může sloužit sestava uvedená na obr. 33 v kapitole 6.8.2 na straně 35. Činnost sestavy s fokusovaným zdrojem se shoduje s činností sestavy s kolimovaným zdrojem.

6.5.6.2 Fázový filtr v sestavě se dvěma polarizátory a jedním Wollastonovým hranolem

Další realizace je možná využitím jednoho Wollastonu a dvou polarizátorů. Tento typ filtru se umísťuje do sestavy místo prostorového filtru.



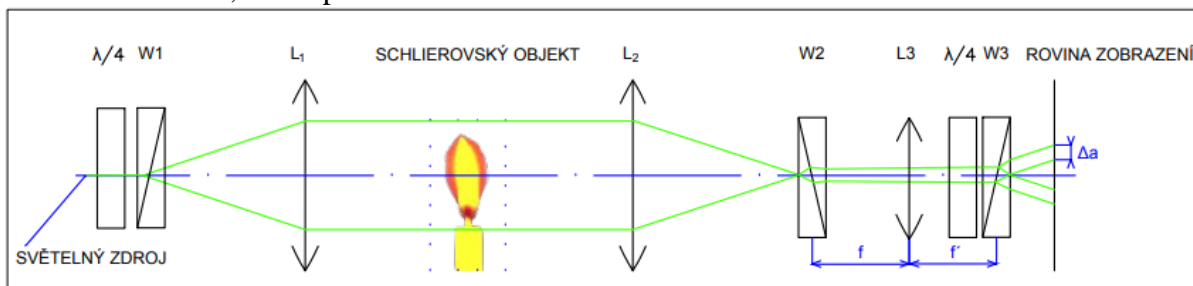
Obr. 30. - Sestava využívající jednoho Wollastonova hranolu a dvou polarizátorů. PL1 - lineární polarizátor 1 s rovinou polarizace stočenou o 45° k polarizačním rovinám Wollastonova hranolu W; W - Wollastonův hranol; PL2 - lineární polarizátor s rovinou polarizace stočenou o 45° k rovinám polarizace Wollastonova hranolu W. Sestava byla komentována například v [74], [77], [90], [41], [18], [7].

První polarizátor má rovinu polarizace stočenou o 45° vůči rovinám polarizace Wollastonova hranolu W. V takovém případě W rozdělí vstupující svazek na dva vzájemně kolmo lineárně polarizované komplementární svazky o stejné intenzitě odchýlené od osy soustavy o shodný úhel. Za W je umístěn další polarizátor, jehož rovina polarizace je otočena o 45° vůči rovinám polarizace na výstupu W. Zobrazovací rovina se volí do prostoru, kde se protnou oba svazky vystupující z W a interferencí spolu interagují. Komplementární pole interferují destruktivně, ale pokud získala vhodný dráhový rozdíl průchodem schlierovským objektem, bude jejich interference konstruktivní a v rovině zobrazení se objeví interferenční proužky nesoucí informaci o gradientu indexu lomu mezi dvěma oblastmi vzorku. Vzdálenost těchto oblastí je dána tentokrát funkcí pozice zobrazovací roviny a separačního úhlu Wollastonu. Při konstrukci

je vhodné volit Wollastonův hranol s malým separačním úhlem. Podle [41] má metoda smysl pro Wollastonův hranol s deviačním úhlem 1° - 2° .

6.5.6.3 Fázový filtr tvořený dvěma Wollastonovými hranoly v sestavě se třemi Wollastonovými hranoly a dvěma $\lambda/4$ destičkami

Použití $\lambda/4$ destičky a Wollastonova hranolu jako analyzátoru za W2. Jedná se o modifikaci sestavy zpracované v kapitole 6.5.6.1. Toto sesavení vytvoří dvě komplementární zobrazení vzájemně fázově posunutá o $\pi/2$. Obě zobrazení se poté zaznamenávají. Tato metoda je vhodná pro záznam kamerou i pro vyhodnocení PIN diodami v případě použití fokusovaného pole v detekční oblasti, viz kapitola 6.8.2 na straně 35.



Obr. 31. - Sestava využívající tři Wollastonových hranolů a dvou $\lambda/4$ destiček.

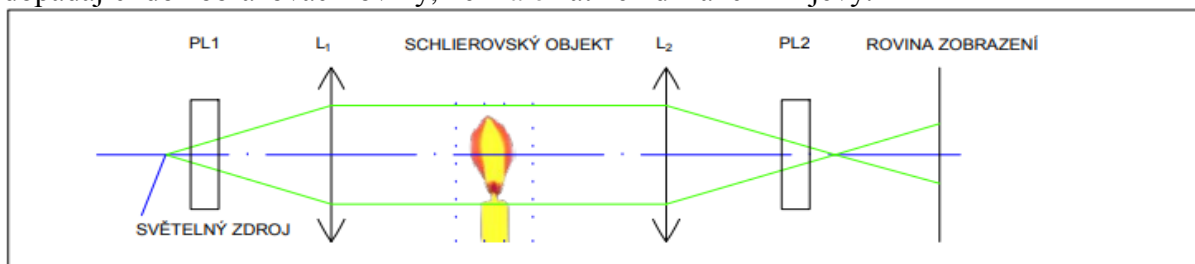
W1 - Wollastonův hranol, L₁, L₂ spojné čočky, W2 - výstupní Wollastonův hranol, L₃ - spojná čočka, $\lambda/4$ - čtvrtvlnná destička; W3 - Wollastonův hranol. Sestava použita v [77].

Činnost sestavy na obr. 31 - světlo ze zdroje dopadá na $\lambda/4$ destičku. $\lambda/4$ - čtvrtvlnná destička upraví lineárně polarizovaný svazek na svazek s kruhovou polarizací. Po průchodu W1 se svazek rozdělí na dva kolmo lineárně polarizované jejichž chod výstupní Wollastonův hranol mění směr šíření ordinerního i extraordinerního svazku kolinearizuje a čtvrtvlnná destička umožní Wollastonovu hranolu W3 rozdělit procházející dvojici svazků na dvě komplementární dvojice svazků, které se zaznamenávají odděleně

Toto zapojení předpokládá použití $\lambda/4$ destičky také na vstupu, hned za laserovým zdrojem. Takové sesavení nevyžaduje, aby rovina polarizace lineárně polarizovaného svazku byla stočena přesně o 45° k polarizačním rovinám. Přesným umístěním W2 tak, aby fokus dopadajících svazků byl umístěn přesně na lámavé ploše Wollastonova hranolu W2, limitně přiblížíme parametr Δa (vzdálenost svazků vstupujících do W3) k nule a svazky mohou interferovat. Použití tohoto typu filtru snižuje kontrast zobrazení, ale v některých případech, jak zmiňují Smeets a George [77], Tropea, Yarin a Foss [87] a další, může mít pozitivní vliv na citlivost.

6.6 Činnost polarizačního filtru při realizaci schlierových metod zobrazení

Polarizační filtr je založen na změně polarizačního stavu při průchodu ovlivněných svazků vzorkem. Pro využití této vlastnosti je nutné použít v sestavě polarizovaný zdroj světla, nejčastěji lineárně polarizovaný se známou rovinou polarizace, nebo kruhově polarizovaný (využití lineárně polarizovaného zdroje a vhodného rotátoru, typicky čtvrtvlnné destičky). Předpokládáme-li, že původní světlo vstupující do zkoumaného objektu bylo koherentní a polarizované, může dojít průchodem přes oblast s odlišným indexem lomu k fázové změně i ke změně polarizačního stavu. Pokud následně polarizačním filtrem propustíme pouze jeden polarizační stav, získáme pole rozdílných intenzit světla interpretující změny indexu lomu v objektu. Jako analyzátor polarizačního stavu po průchodu objektem je možné použít polarizátor, $\lambda/4$ destičku, dvojlomý hranol (Wollaston, Nomarsky a podobně), případně jejich kombinaci. Podle polarizačního stavu dopadajícího na analyzátor se neovlivněné svazky nechají projít na detekční prvek s maximální intenzitou, ovlivněné svazky budou mít intenzitu nižší, nebo budou zablokovány úplně, podle úrovně filtrace a změny polarizace. Výjimkou může být užití čtvrtvlnné destičky před polarizátorem v případě dopadajícího lineárně polarizovaného neovlivněného svazku. V tomto případě neovlivněné svazky získají kruhový polarizační stav, kdežto ovlivněné svazky, získají polarizační stav eliptický a vhodně nastaveným analyzátozem v podobě lineárního polarizátoru budou procházet s vyšší intenzitou. Polarizační filtry jsou obecně konstrukčně jednodušší než filtry diferenciální. Nedochází k interferencím, které zlepšují kontrast zobrazení a při použití konstrukčně jednodušších filtrů dochází ke spojitému částečnému útlumu, což přispívá ke zhoršení kontrastu zobrazení, a tedy i citlivosti schlierovského zobrazení. Polarizační filtr má také vliv na celkovou intenzitu záření dopadající do zobrazovací roviny, není ale zatížen difrakčními jevy.



Obr. 32. - Základní sestava s využitím dvou polarizátorů.

PL 1, PL 2 - lineární polarizátory; L1, L 2 - spojené objektivy. Sestava komentována v [93], [72].

Na obr. 32. jsou PL1, PL2 - lineární polarizátory se shodným směrem roviny polarizace (shodně natočené). V tomto případě se volí rovina zobrazení v takové vzdálenosti, aby obraz objektu vytvořený prvkem L2 byl ostrý.

Ideu využití polarizovaného světla v sestavách zobrazujících prvky s různým indexem lomu obdobně jako v metodách schlierového zobrazení poprvé s úspěchem využili Francon a Nomarski v mikroskopii. Záhy se objevily aplikace pro zobrazování proudění a let projektilů. V případě měření makroskopických objektů lze polarizační filtr doplnit následným vložením Newtonova skla. Při použití bílého světla a Newtonova skla dojde i k barevnému škálování a zvýšení kontrastu zobrazení interferencí. Polarizační filtr se musí v tomto případě kombinovat s Wollastonovým hranolem. Wollastonův hranol rozdělí polarizační stavy průchozího vlnění. V praxi se používají dva polarizátory pro zvýšení kontrastu zobrazení. Polarizační filtry se také často kombinují s $\lambda/4$ destičkou.

Pro popis schlierovského objektu lze vyjádřit vliv změny polarizace například takto [41]:

$$n - 1 = \frac{2\pi\alpha L\rho}{M} = K\rho = 2\pi\alpha n \quad (56).$$

Ve vztahu je L - rozměr schlierovského objektu v ose z , M - molekulární hmotnost, α - molární polarizovatelnost, n - index lomu schlierovského objektu K - Gladstone-Dale koeficient.

6.7 Detekce

Nezbytnou součástí schlierových metod zobrazení je zobrazování výsledku. Parametry nástroje pro zobrazení či záznam výsledků mají často zásadní vliv na kvalitu zobrazení a limitují možnosti sestavy.

6.7.1 Zobrazovací nástroje

Pro detekci výsledků schlierovských optických metod můžeme použít několik základních nástrojů; pozorování ozbrojeným či neozbrojeným okem, zobrazení na stínítku, elektronické senzory (nejčastěji CCD čipy nebo PIN diody), nebo fotografický film a jeho obdoby. Lidské oko i fotografické záznamové metody jsou citlivé na intenzitu osvětlení logaritmicky. Každá z metod má svá specifika.

6.7.1.1 Zobrazení na stínítku

Stínítko lze popsat jako kolmý průmět, předmět umístěný do roviny kolmé na vzažnou osu soustavy, a vzniká na něm obraz promítnutý. Stínítko se umísťuje do zobrazovací roviny a obrazce dále pozorujeme okem nebo záznamovým optickým přístrojem. Při zobrazení na stínítku není nutné použít žádnou další optiku a stínítko umístíme do prostoru, kde bude ostrý obraz předmětu. Vlivem principu schlierového zobrazení nemají při použití prostorového nebo polarizačního schlierového filtru projevy v intenzitě za filtrem oblast, kde by byly ostřeji pozorovatelné.

6.7.1.2 Pozorování okem

Je nejstarší variantou pozorování schlier. Je nutné zvážit intenzitu světla v rovině zobrazení, aby nedošlo k poškození zraku. Při pozorování okem je vhodné použít pozorovací objektiv. Ohnisková vzdálenost oka je přibližně 15.9 mm, hloubka ostrosti mezi 2 až 4 cm, dobrá citlivost na kontrast zobrazení při jasu od 100 do 10,000 cd/m². Expoziční ekvivalent oka je ISO 2000. Oko má poměrně dlouhou zotavovací dobu 1/10 s a rychlejší děje nepostřehne. Teoretický datový tok oka je 1000-10000 bit/s, přičemž moderní vysokorychlostní kamery mohou pořizovat záznam o efektivním datovém toku řádově Tbit/s. Je jasné, že prostým okem nemůžeme pozorovat rychlé fyzikální děje. [42], [74], [78].

6.7.1.3 Záznam analogovou fotografií

Záznam může být proveden na film, fotografické desky a podobě. Složení fotografické emulze má pak zásadní vliv na citlivost nebo nezbytnou minimální dobu expozice. V dnešní době mají význam emulze se silnou vrstvou fotocitlivého materiálu, které mohou poskytnout částečně prostorovou informaci o objektu při použití speciálních metod a sestav. [74], [90], [77], [80]

6.7.1.4 Záznam PIN diodami

Užívá se pro zobrazování časového průběhu intenzity ozáření velmi úzkým svazkem paprsků jdoucí schlierovským objektem. Takový záznam je vhodný pro kvantitativní popis schlierovského objektu a s výhodou se užívá lineárního pole diod, které poskytuje informace o jednom řezu objektem. Takové měření může podle typu použitých PIN diod mít podstatně vyšší

rychlosti záznamu, než by bylo možné dosáhnout jiným způsobem. Často se užívá v sestavách s fázovým filtrem [74].

6.7.1.5 Záznam na CCD čip

Je dnes nejběžnějším způsobem záznamu. CCD čip je základním prvkem záznamu digitálním fotoaparátem, digitální kamerou i vysokorychlostní digitální kamerou. Citlivost a rozlišovací schopnosti sestavy jako celku ovlivňují v tomto případě vlastnosti záznamového zařízení, zejména pak rozlišení, světelnost, velikost čipu a způsob jeho čtení, který má velký dopad na datový tok (FPS). Podstatným kritériem při využití digitálního záznamu je Nyquistův - Shannonův vzorkovací teorém. V případě záznamu zobrazení se jedná o kritérium, kdy vzorkovací frekvence (minimální rozměr pixelu) musí být alespoň dvojnásobná než nejmenší zobrazovaný objekt, aby bylo možné považovat zobrazení za věrné. V případě nedodržení tohoto kritéria, se mohou zobrazované body prolínat a nastává takzvaný aliasing a dochází k částečné nebo úplné ztrátě informace.

6.7.2 Záznam na analogové nebo digitální fotografické médium

Ze zobrazovací rovnice snadno vyvodíme vztahy určující parametry objektivu zobrazovacího aparátu:

Ohnisko objektivu fotoaparátu f_3 :

$$f_3 = \frac{m(f_2^2 + l \cdot g)}{f_2 - m \cdot l} \quad (57).$$

Přičemž f_2 - ohnisko zobrazovacího prvku, g - poloha objektivu za výstupním ohniskem schlierové sestavy, $l + f_2$ - poloha objektu před posledním zobrazovacím prvkem schlierové sestavy, m - zvětšení, $m = \left(\frac{l}{f_2}\right)$.

Poloha zobrazovací roviny e (v ose \mathbf{z} , za prostorem fokusu neovlivněných svazků):

$$e = m \cdot \left(f_2 - \frac{l \cdot g}{f_2}\right) = \frac{f_3 \cdot (f_2^2 - l \cdot g)}{f_2^2 - l \cdot g + f_3 l} \quad (58).$$

Záznamové médium má zásadní vliv na parametry a citlivost sestavy. Při návrhu měření je nezbytné vzít v úvahu expoziční dobu, záznamovou frekvenci i intenzitu osvětlení ve zobrazení tak, aby byl pořízen optimální záznam zkoumaného jevu a nedošlo k poškození přístrojů. Rozlišení a citlivost záznamového média má přímý vliv na citlivost sestavy schlierového zobrazení viz kapitola 6.9.1 na straně 46. Při konstrukci sestavy schlierového zobrazení musíme zohlednit velikost záznamového prostoru (dnes typicky rozměr CCD čipu). Pro záznam schlierových zobrazovacích technik je nevhodná adaptivní optika. [74]

6.8 Základními konstrukce sestav pro schlierové zobrazování

V této části práce se budou popsány základní podoby sestavení optických prvků pro vytvoření vhodného chodu paprsků v detekční oblasti a jejich fokusu do oblasti schlierového filtru (břítu). Pro jednoduchost je obecně v sestavě zařazen jednoduchý prostorový břit, který je však možno nahradit jiným vhodným filtrem pro zobrazování schlier uvedeným v podkapitolách kapitol 6.4, 6.5, 6.6, přičemž výběr filtru schlierového zobrazení musí korespondovat s výběrem vhodného světelného zdroje uvedeného v podkapitolách kapitoly 6.3. Parametry sestavy a tvar pole v detekční oblasti, které budou posány v kapitolách 6.8.1, 6.8.2 a trasování paprsků, které bude popsán v kapitole 6.8.3 jsou stěžejní pro stanovení parametrů citlivosti sestavy, kontrastu zobrazení i možností kvantifikace měření.

6.8.1 Dělení sestav schlierového zobrazení

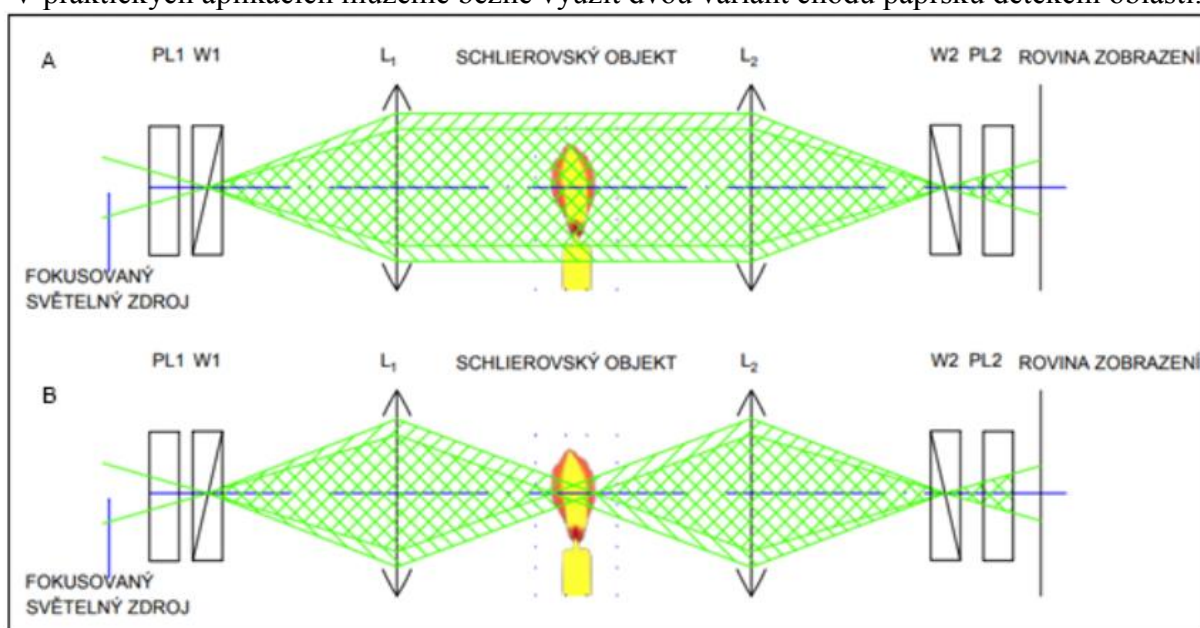
Principiálně můžeme sestavy rozdělit podle několika kritérií.

- Soustavy mohou pracovat se zrcadly, čočkami a objektivy, nebo specifickým pozadím.
- V detekční oblasti mohou vytvářet homogenní, fokusované, sbíhavé či rozbíhavé pole.
- Svazky záření mohou schlierovským objektem procházet jednou, dvakrát či vícekrát.
- Velikost detekční oblasti může být od několika desítek mikrometrů po desítky metrů.
- Zdroj a filtr mohou být v jedné ose "in line", nebo uloženy mimoosově "of axis"

Mohli bychom nalézt i další kritéria, jak hodnotit a třídít sestavy schlierového zobrazení. Existuje velké množství různých sestav a druhů zapojení či detekce schlierového zobrazování, z nichž jsou zde popsány jen základní typy a obvyklé sestavy. V závěru kapitoly jsou pak okrajově zmíněny některé speciální aplikace.

6.8.2 Chod paprsků v detekční oblasti

V praktických aplikacích můžeme běžně využít dvou variant chodu paprsků detekční oblasti.



Obr. 33. - Chod paprsků detekční oblasti.

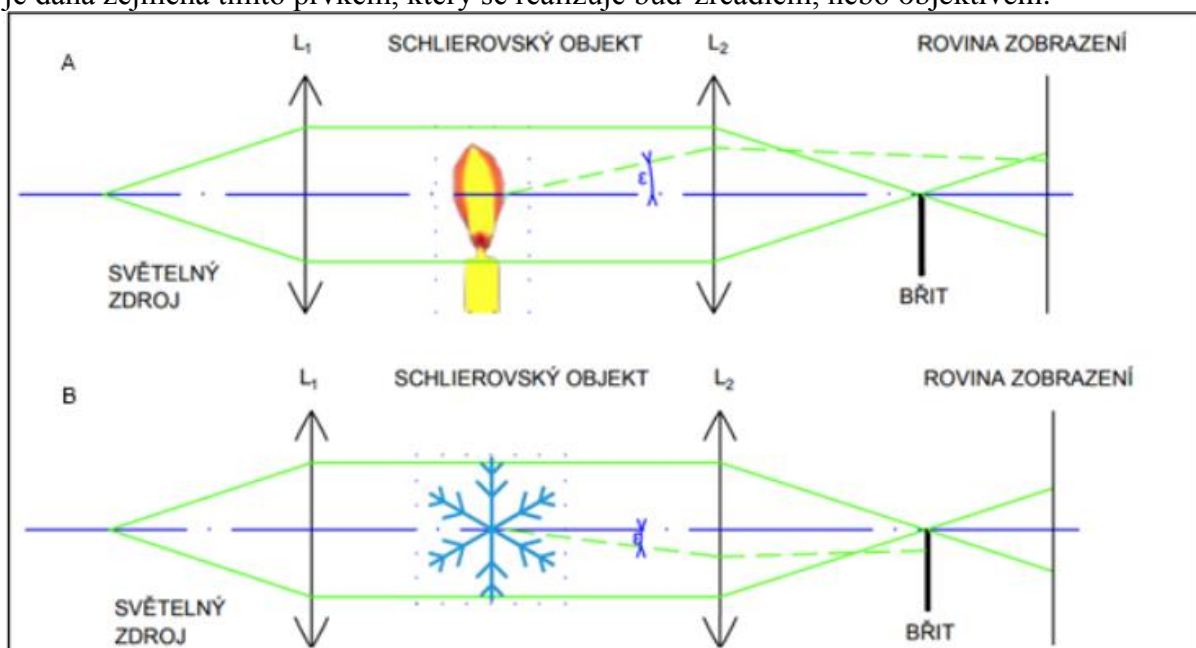
PL1, PL2 - lineární polarizátory; W1, W2 - Wollastonovy hranoly; L1, L2 - objektivy, nebo čočky

Na obr. 33. v případě A jsou v detekční oblasti svazky rovnoběžné a homogenní. V případě B, je snaha dosáhnout v detekční oblasti svazku fokusovaného na rovinu schlierovského objektu. Tato varianta sestavy se velmi často používá v mikroskopech, nebo při detailním studiu velmi malých vzorků. Pro demonstraci těchto dvou stěžejních případů chodu paprsků v detekční oblasti jsem zvolil sestavu se dvěma Wollastonovými hranoly a fokusovaným světelným zdrojem, která je v literatuře často uváděna. Metodu lze modifikovat pro záznam pomocí PIN diod (měření v bodě, nebo bodech schlierovského objektu) výhodný zejména při zkoumání velmi rychlých dějů. Podstata činnosti sestavy s fárovým břítem realizovaným pomocí Wollastonova hranolu byla uvedena v kapitole 6.5.6. [74], [12], [77], [65], [90]

Další možností je osvětlení schlierového objektu kuželovou plochou, což se využívá zejména u sestav s jedním zobrazovacím optickým prvkem, v prostoru mezi světelným zdrojem a filtrem, nebo břítem schlierového zobrazení. Jako příklad lze uvést sestavu s jedním objektivem, (Toepler 1854), která bude uvedena v kapitole 6.8.4.1, nebo jednozrcadlovou schlierovou sestavu "of axis", podrobněji popsána v kapitole 6.8.5.2.

6.8.3 Trasování paprsku a možnosti kvantitativního měření

Již byly uvedeny základní sestavy schlierových metod i způsoby filtrace schlierového obrazu. Všechny sestavy mají jeden společný rys. Obsahují prvek, který fokusuje svazky, přičemž v oblasti fokusu neovlivněných svazků se umísťuje schlierový filtr, nebo břít. Citlivost soustavy je dána zejména tímto prvkem, který se realizuje buď zrcadlem, nebo objektivem.

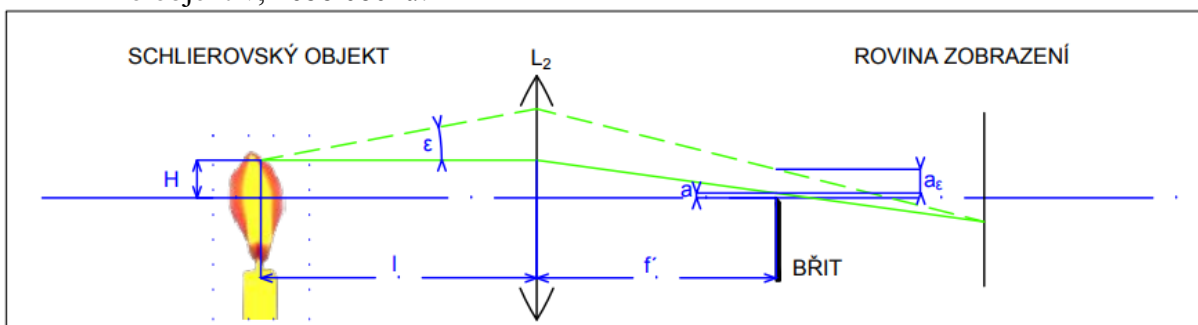


Obr. 34. - Vliv směru gradientu indexu lomu na chod ovlivněných paprsků.

L_1 a L_2 - spojné čočky, nebo objektivy. Posouzení schlierovského objektu: A - gradient indexu lomu ve směru osy x je kladný \Rightarrow úhel ε je kladný (například oblast horkého vzduchu); B - gradient indexu lomu ve směru osy x je záporný \Rightarrow úhel ε je záporný (například oblast studeného vzduchu).

Pro správné určení chodu paprsku je podstatné určit, jestli úhel odchýlení ε je kladný (obr. 34 - A), nebo záporný (obr. 34 - B), což udává, jestli je kladný, nebo záporný gradient indexu lomu, jak bylo popsáno v kapitole 6.2.1 na straně 7. V případě metod s částečnou kvantifikací získáme tuto informaci z měření, včetně intervalu (velikosti) ε , při měření kvalitativním popisuje informaci o směru gradientu zvýšení (obr. 34 - A), nebo snížení (obr. 34 - B) intenzity světla v rovině zobrazení. Pro znázornění situace trasování paprsků je výhodné se omezit pouze na popis chodu paprsků po průchodu schlierovským objektem, za zjednodušujícího předpokladu, že paprsky v detekční oblasti jsou homogenní a kolimované.

- Pro objektiv, nebo čočku:



Obr. 35. - Znázornění chodu paprsků za schlierovským objektem v sestavě s objektivem.

H - výška bodu na schliere; ε - úhel odchylení; l - poloha schlierovského objektu před čočkou; f' - ohnisková vzdálenost čočky L_2 ; a - nezastíněná část obrazu světelného zdroje; Δa - posunutí obrazu zdroje.

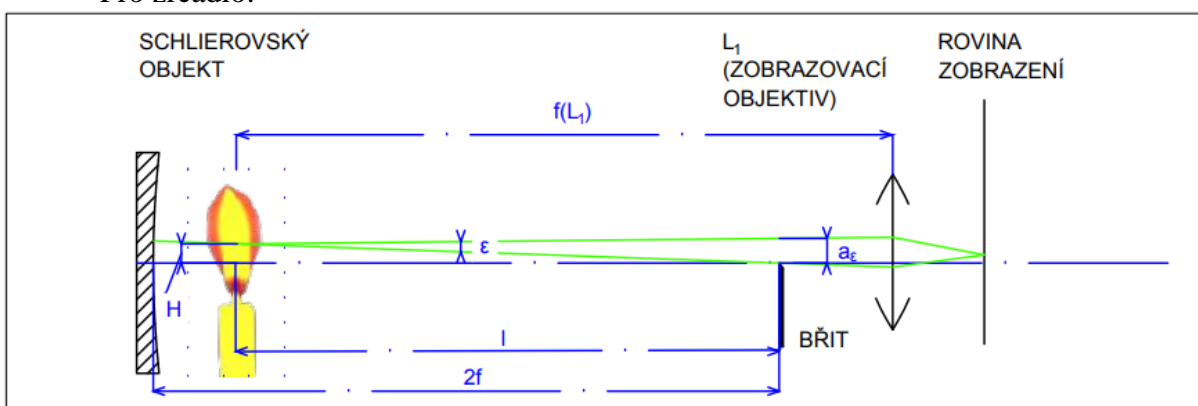
Posunutí obrazu zdroje lze vyjádřit jako:

$$a_\varepsilon = f' \cdot \operatorname{tg}(\varepsilon) \quad (59).$$

Pro malé úhly odchylení ε platí:

$$a_\varepsilon \approx \varepsilon \cdot f' \quad (60).$$

- Pro zrcadlo:



Obr. 36. - Znázornění chodu paprsků za schlierovským objektem v sestavě se zrcadlem.

Pro malý úhel ε , autor Vasilev L. A. [90] vyvodil vztah:

$$a_\varepsilon \approx \varepsilon \cdot l \cdot \left(1 + \frac{H^2}{l^2}\right) \quad (61).$$

Odtud lze zavést obdobnou aproximaci jako pro čočku:

$$a_\varepsilon \approx \varepsilon \cdot f \Leftrightarrow \frac{H}{l} < 0.1 \quad (62).$$

- Speciální případy uložení filtru mimo fokus neovlivněných svazků

Pro vyjádření úhlu odchylení ε , při schlierovém filtru nebo břitu uloženém mimo ohnisko zavádí Vasilev [90] vztah:

$$\varepsilon = \frac{a_\varepsilon}{f + \frac{\Delta z}{f} \cdot (l - f)} \quad (63).$$

Přičemž parametr Δz je poloha filtru, nebo břitu v ose z , vzhledem k poloze fokusu neovlivněných svazků. Nutno zdůraznit, že Δz je záporné, je-li břit od místa fokusu neovlivněných svazků ve směru šíření svazku (k zobrazovací rovině).

Princip kvantifikace prostorovým filtrem:

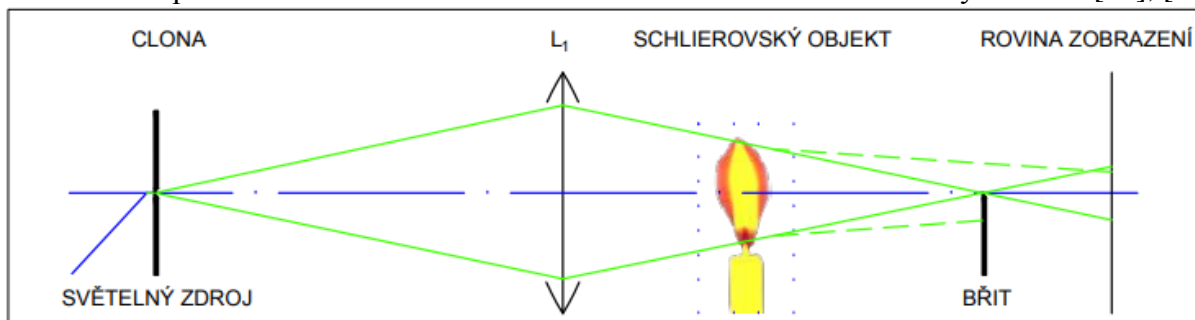
V případě návrhu filtru pro kvantifikaci bychom navrhovali filtr schlierového zobrazení tak, abychom úhly odchýlení ε rozdělili na vhodné intervaly. Pro výpočet polohy barevných filtrů by bylo možné dosazovat jejich uvažovatelné rozměry za parametr a_ε v obr. 35, 36.

6.8.4 Sestavy prvků využívajících optických čoček pro vytvoření pole v detekční oblasti

Historicky se začalo schlierové zobrazování provádět pomocí čoček. [85], [59] Typicky se konstruují “in line“ sestavy. Často bývají konstrukčně komplikovanější a kladou značné požadavky na kvalitu použitých prvků. Použité čočky nesmí obsahovat defekty, vnitřní pnutí a musí být velmi kvalitně vybroušeny. Sestavy z čoček mají také obvykle menší detekční pole. Užívání sestav s čočkami se od 70. do 80. let 20. století spíše omezovalo, ale zejména s rozvojem využívání laseru i schlierových metod orientovaných na pozadí pro schlierové zobrazování a digitální fotografie pro jejich záznam dochází k opětovnému rozvoji sestav s optickými čočkami. [74]

6.8.4.1 Sestava s jednou spojnou čočkou (Toepler 1854)

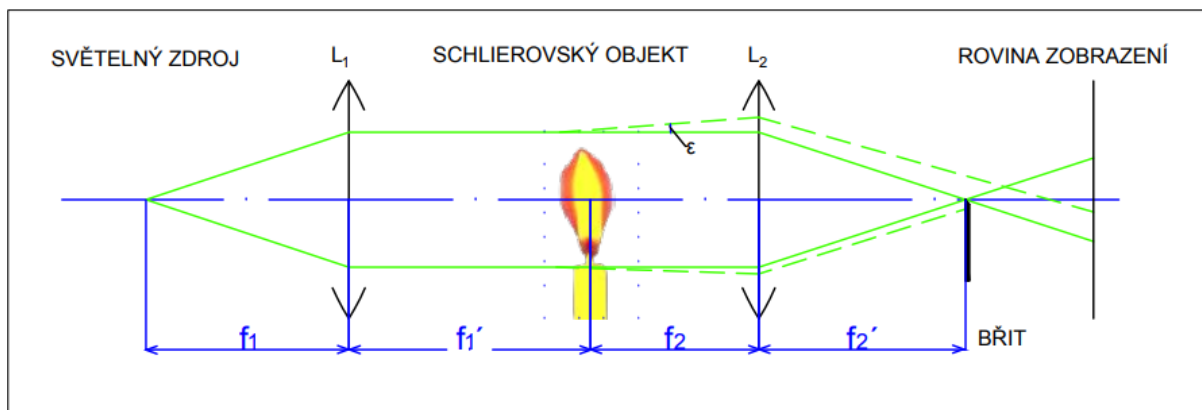
Na obr. 37. je znázorněna nejjednodušší schlierová zobrazovací sestava využitá Toeplerem v roce 1854 obsahující spojnou čočku a břit. Sestava je náročná na přesné justování, objekt je převrácený a pozorované projevy objektu jsou velmi slabé, proto jsou často maskovány optickými vadami použité čočky. Sestavu omezuje spojná čočka, která musí mít velkou ohniskovou vzdálenost a její průměr definuje velikost testovací oblasti. Sestava je prostorově náročná. Toepler udává vhodnou ohniskovou vzdálenost zobrazovací čočky $f > 2$ m. [40], [28]



Obr. 37. - Toeplerova sestava s jednou spojnou čočkou.

6.8.4.2 Toeplerova sestava se dvěma objektivy nebo čočkami a homogenními svazky v detekční oblasti

Tuto sestavu s využitím prostorového břítu publikoval poprvé Toepler roku 1866 [85]. Sestava se dvěma čočkami nebo objektivy, mezi nimiž je testovací oblast, je praktičtější než předchozí sestava s jednou čočkou. Zejména pro zobrazování 2D schlierovských objektů, nebo objektů uzavřených v kyvetách či proudovodech je vhodné použití rovinné vlny v testovací oblasti. Zobrazování schlier je mnohem kvalitnější, tato sestava je velmi využívána k schlierovému zobrazování s ohledem na jednoduchost a kvalitativní i kvantitativní efektivitu. Výhodou je také přijatelný délkový rozměr, který je dán především ohniskovou vzdáleností L_2 . Při použití identických čoček, nebo objektivů L_1, L_2 tvoří nejpodstatnější část délkového rozměru sestavy čtyřnásobek ohniskové vzdálenosti.



Obr. 38. - Toeplerova sestava se dvěma objektivy, nebo čočkami
 L_1 , L_2 - čočky, nebo objektivy; f_1 , f_2 - předmětová ohniska, f_1' , f_2' - obrazová ohniska.

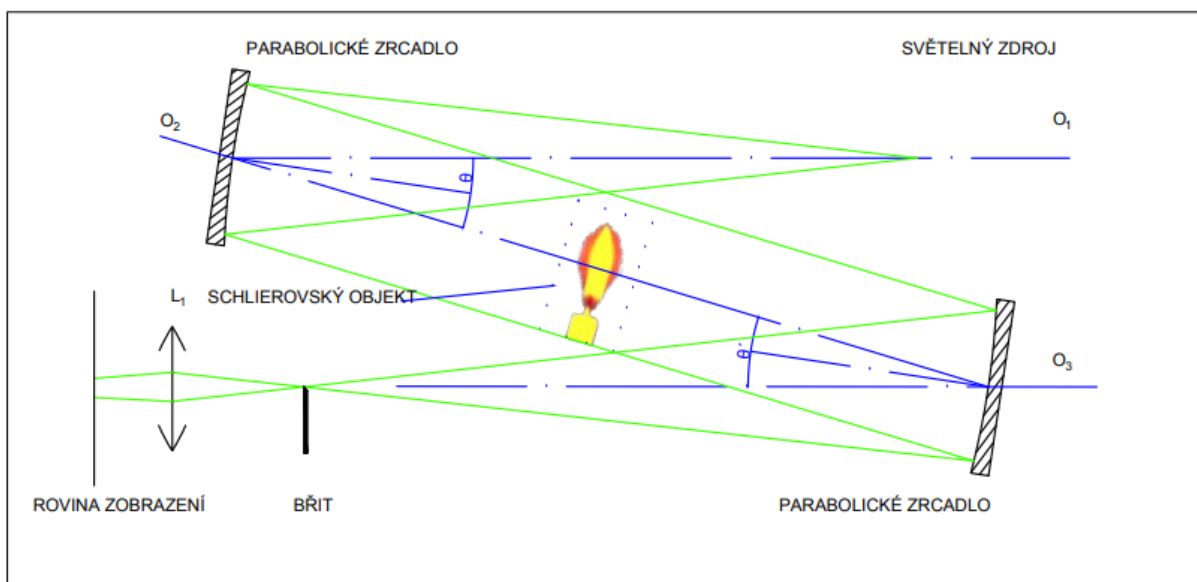
V prostoru fokusu neovlivněných svazků za detekční oblastí je umístěn prostorový břit. Dnes se tato sestava používá jako základní typ sestavy využívající čoček, nebo objektivů pro vytvoření homogenního kolineárního pole v detekční oblasti a kombinuje se se všemy typy filtrů schlierového zobrazení a jim odpovídajících světelných zdrojů. [74], [85]

6.8.5 Sestavy prvků využívajících zrcadel pro vytvoření pole v detekční oblasti

Nejběžnější jsou sestavy prvků s jedním či dvěma zrcadly. Využití zrcadel pro schlierové zobrazování klade vysoké nároky na kvalitu zrcadel. Podle Weinberga [96], pokud odchylka zobrazení zrcadlem dosahuje šestinásobku užité vlnové délky, sníží se podstatně citlivost celé sestavy pro zobrazení projevů schlier. Pro schlierové zobrazování se využívá zrcadel konkávních, a to jak parabolických, tak sférických (podle typu sestavy). Pro velké ohniskové vzdálenosti ($f > 2m$) jsou rozdíly mezi zobrazením parabolickým a sférickým jen minimální. Parabolická zrcadla, která jsou součástí kvalitních teleskopů, jsou vhodná k využití ve schlierových zobrazovacích sestavách. [74], [96]

6.8.5.1 Herschellianova sestava (dvouzrcadlová schlierová sestava Z-tyt)

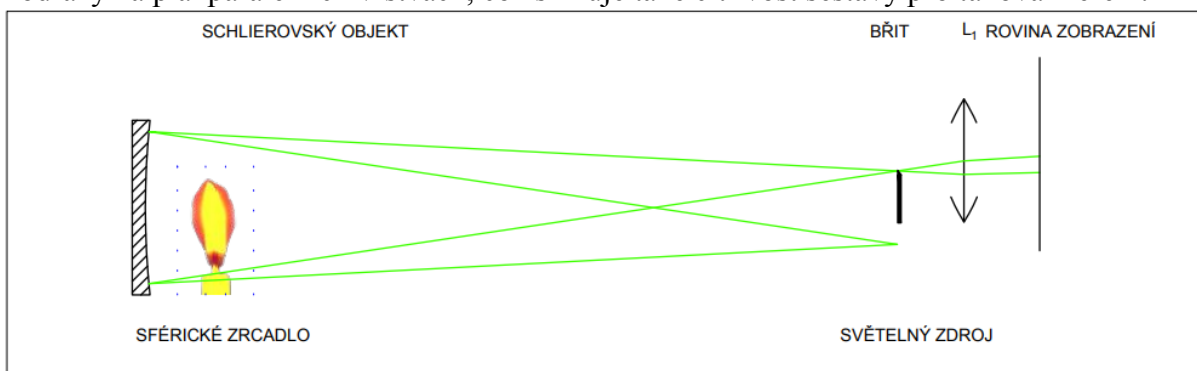
Nejběžnější uspořádáním dvojice parabolických zrcadel je uspořádání „z-tyt“ (Herschellianova sestava), využívající dvou protilehlých zrcadel, vzájemně skloněných vůči společné ose. Světelný zdroj vyzařuje rozbíhavý světelný svazek a je umístěn v ohniskové vzdálenosti prvního zrcadla. První zrcadlo vytváří zkolimovaný světelný svazek, který prochází detekční oblastí, šíří se ve směru osy O_2 . Po odrazu druhým zrcadlem se šíří ve směru osy O_3 a je fokusován. Do prostoru fokusu neovlivněných svazků je umístěn schlierový filtr soustavy, za kterým se nachází zobrazovací rovina. Osa rozbíhavého svazku O_1 je rovnoběžná s osou fokusovaného svazku O_3 . Mezi oběma zrcadly tvoří svazek homogenní rovnoběžné paprsky, jdoucí přes schlierovský objekt, umístěný kolmo na směr šíření (kolmo k ose O_2). Osy O_1 , O_2 , O_3 tvoří tvar písmene Z, odtud pochází název „Z-tyt“. Předností této sestavy je pole rovnoběžných homogenních svazků v detekční oblasti. Dalšími výhodami jsou konstrukční jednoduchost, velikost a tvar pole v detekční oblasti, přičemž velikost pole závisí pouze na rozměru užitých zrcadel, proto detekční oblast může být poměrně rozměrná. Nevýhodou je nutnost použití shodných zrcadel, což může být nákladné. Dalším problémem může být počáteční justáž, která musí být provedena s vysokou přesností a s důrazem na symetrii úhlů mezi osami svazků. Při konstrukci je nutné dodržet, aby úhel θ byl co nejmenší a důsledně se dbá na to, aby schlierovský objekt nezasahoval do svazků mezi zdrojem a parabolickým zrcadlem, nebo následujícím zrcadlem a zobrazovací rovinou. [74], [82], [80], [4]



Obr. 39. - Dvouzrcadlová schlierová sestava "Z-ty".

6.8.5.2 Jednozrcadlová schlierová sestava "of axis"

Sestava obsahuje sférické zrcadlo, (ve výjimečných případech velmi dlouhé ohniskové vzdálenosti, nad 3 m lze použít i parabolické zrcadlo) a světelný zdroj uložený v jedné rovině se schlierovým filtrem (břit). Obraz zdroje vytvořený zrcadlem je přesně v prostoru filtru (břitu). Zdroj světla se klade obvykle velmi blízko břitu, aby byl úhel dopadu a odrazu co nejmenší. Potom dochází s výhodou ke dvojímu průchodu vzorkem po velmi podobné trajektorii a tím je projev změny indexu lomu větší, než by tomu bylo při jednom průchodu. Velmi výhodné je umístění zdroje i břitu ve vzdálenosti středu křivosti zrcadla ($2f$). Někdy se využívá většího úhlu mezi dopadajícím a odraženým svazkem a detekční oblast se umístí pouze do jednoho svazku, dojde tak pouze k jednomu průchodu svazku schlierovským objektem. Taková konstelace nezachytí vícenásobný obraz objektu na kameře. Výhodou této sestavy je jednoduchost. Parazitním jevem tohoto uspořádání je vícenásobný obraz. Použití kyvet a průzorů je v této sestavě problematické a dochází ke zkreslení výsledků vícenásobným odrazem i odrazy na planoparalelních vrstvách, což snižuje také citlivost sestavy pro taková měření.

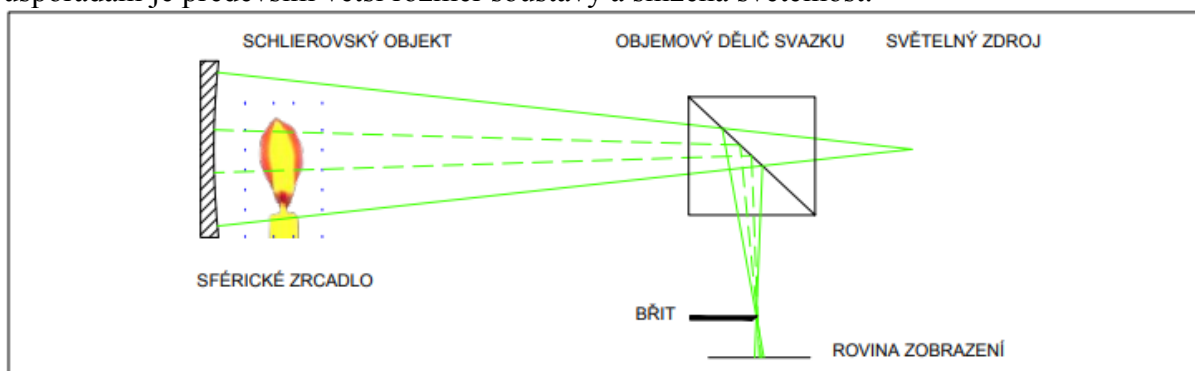


Obr. 40. - Jednozrcadlová schlierová sestava "of axis".

6.8.5.3 Jednozrcadlová schlierová sestava s děličem svazku

Dělič svazku se umísťuje před střed křivosti zrcadla. Sestavu tvoří světelný zdroj, detekční oblast a sférické zrcadlo umístěné v jedné ose, takzvaná sestava s detekční oblastí "in line" (v jedné ose). Dochází s výhodou ke dvojímu průchodu vzorkem a tím je projev změny indexu lomu větší, než by tomu bylo při jednom průchodu. Kamera a filtr se kladou na paralelní

optickou osu a svazky jsou odkloněny objemovým optickým děličem. Výhodou této sestavy je chod paprsků detekční oblastí před odrazem i po odrazu zrcadlem po stejné trajektorii. Vlivem vhodného chodu paprsků detekční oblastí nevzniká zdvojení obrazu. Nevýhodou tohoto uspořádání je především větší rozměr soustavy a snížená světelnost.



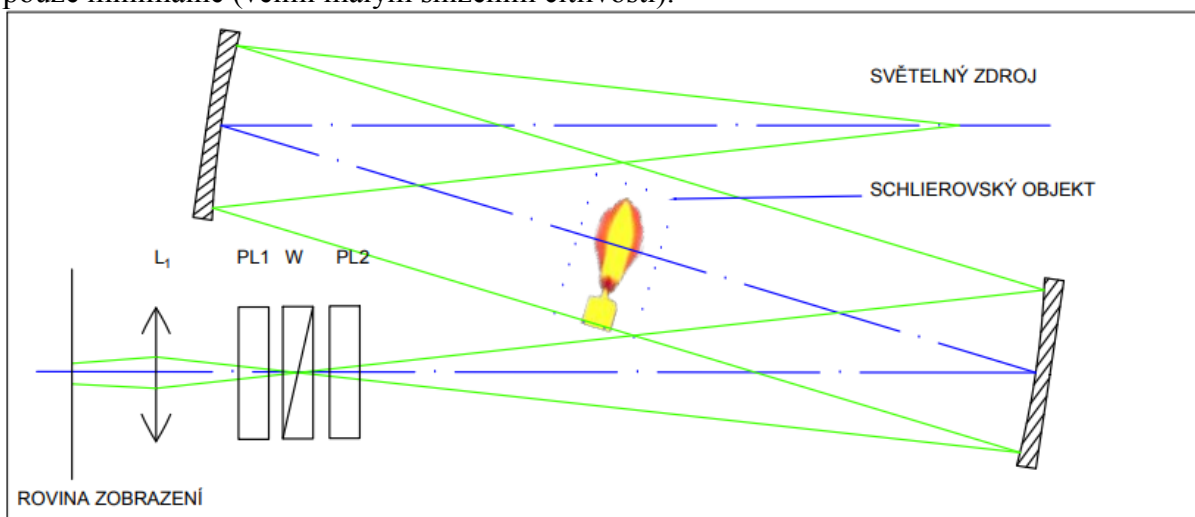
Obr. 41. - Schéma jednozrcadlové schlierové sestavy s děličem svazku.

6.8.5.4 Jednozrcadlová schlierová sestava s reflexním břítem

Tato sestava je pokusem eliminovat problémy jednozrcadlové sestavy “in line” s děličem svazku. Tyto problémy jsou dány úbytkem intenzity světla vlivem průchodu přes dělič svazků. Do ohniska sférického zrcadla s velkým poloměrem křivosti se umístí reflexní břit, který odráží část svazků odchýlených průchodem přes schlierovský objekt. Jedná se tedy o sestavu se schopností zachytit výlučně temné pole. Sestava již byla popsána v kapitole 6.4.8 *Polopropustné, reflexní a částečně reflexní prostorové bříty* na straně 23.

6.8.5.5 Použití kombinace sestavy prvků se zrcadly a diferenciálního břitu s Wollastonovými hranoly na příkladu sestavy Z-typ

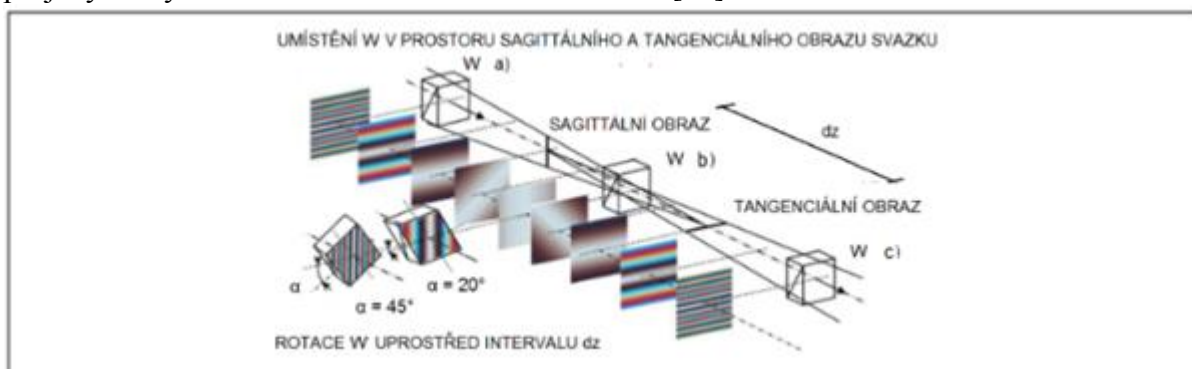
Sestavy využívající zrcadel a chodu paprsků “of axis” mají astigmatickou optickou vadu. Pokud je úhel, který svírá osa dopadajícího a odraženého svazku, dostatečně malý, jsou projevy této vady také velmi malé. Vada se projeví především u jednozrcadlových sestav. V případě použití břitu uloženého do roviny vybraného obrazu (horizontálně uložený břit do tangenciálního obrazu, vertikálně uložený břit do roviny sagittálního obrazu), se vada projeví pouze minimálně (velmi malým snížením citlivosti).



Obr. 42. - Sestava “Z - typ” s fázovým “břítem”.

Jak je naznačeno na obr. 42, fázový filtr je složený ze dvou lineárních polarizátorů a jednoho Wollastonova hranolu (viz kapitola 6.5.6).

V případě užití “of axis” zrcadlových metod dojde k projevům astigmatismu, vlivem odrazu na sférickém zrcadle. Polohy pro uložení Wollastonova hranolu ve “fázovém břítu” a jejich projevy ve výsledném zobrazení lze znázornit takto [19]:



Obr. 43. - Uložení Wollastonova hranolu vzhledem k fokálním rovinám sestavy.

W a), b), c) - možné polohy umístění fázového “břítu”, dz - vzdálenost mezi astigmatickými fokálními rovinami (sagitální a tangenciální). Vlevo od znázornění polohy Wollastonova hranolu v ose z sestavy jsou znázorněny očekávané výsledky měření s bílým světlem bez schlierovského objektu. Na obrázku je patrné i znázornění vlivu rotace Wollastonova hranolu přesně uprostřed mezi fokálními rovinami. Převzato z [19].

Poloha fázového filtru (poloha Wollastonova hranolu W). Pokud pohybuje W v ose z , v oblasti dz z pozice W a) do pozice W c), mění se orientace interferenčních proužků (o -90°) a snižuje se jejich počet. Přesně uprostřed v pozici W b) získáváme téměř homogenní pole (pozadí). Pokud se vzdalujeme od středu mezi sagitálním a tangenciálním obrazem, interferenční proužky dále rotují (až o $+90^\circ$) a zvyšuje se jejich počet. Pokud je Wollaston umístěn uprostřed, pak interference vznikají ve směru kolmém na rovinu deviačního úhlu Wollastonova hranolu. Počet interferenčních proužků je podle Desse M. a F. Olchewesky [19] možné měnit natočením W, nebo změnou pozice v ose z . Pokud by bylo použito bílého světla jako světelného zdroje, bude poloha interferenčních maxim různá pro jednotlivé vlnové délky, což je také naznačeno na obr. 43. [19]

6.8.6 Sestavy využívající zobrazení se specifickým pozadím schlierovského objektu

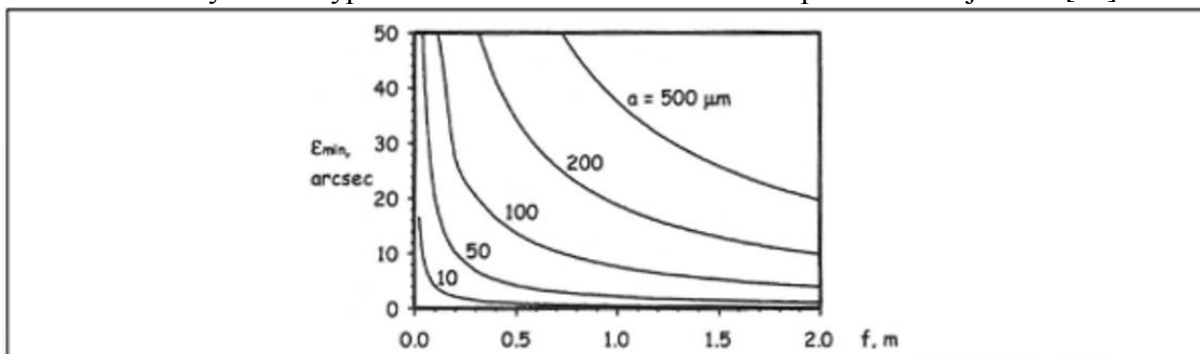
Specifické pozadí lze realizovat zavedením interferenčních či difrakčních obrazců do detekční oblasti jako pozadí schlierovského objektu. Dalšími možnostmi jsou například použití masky, rastru či jiného filtru, případně reflexního zdroje s předem definovanou polohou světlých a tmavých bodů. Metodu je možno realizovat i barevně, ale barevné provedení nemá přímý vizuální benefit. V této kapitole bude rozpracováno schlierové zobrazování se specifickým pozadím, se zaměřením na speciální případy, protože lze využít rozmanitou škálu sestav. Základní sestavy pro schlierové metody se specifickým pozadím byly popsány při vysvětlení činnosti užívaného prostorového filtru (rastru) v kapitole 6.4.9 *Prostorové filtry metod orientovaných na pozadí* na straně 23 a 24 a v této kapitole proto nejsou zopakovány. Pro nejmenší detekovatelný úhel ε_{min} při využití těchto metod platí:

$$\varepsilon_{min} = \frac{\phi_P}{z_{L1} - f_1} \quad (64).$$

Zde ϕ_P - průměr bodu v detekční oblasti (dle metody též šířka interferenčního proužku v rovině objektu, nebo kolmý průřez světelným kuželem od světelného zdroje), f_1 - ohnisková vzdálenost

čochy, z_{L1} - vzdálenost rastru od čočky (objektivu) L_1 . Schlierovský objekt je umístěn do objektového ohniska prvku L_1 [74].

Citlivost sestavy tohoto typu závisí na ohniskové vzdálenosti použitého objektivu [74].

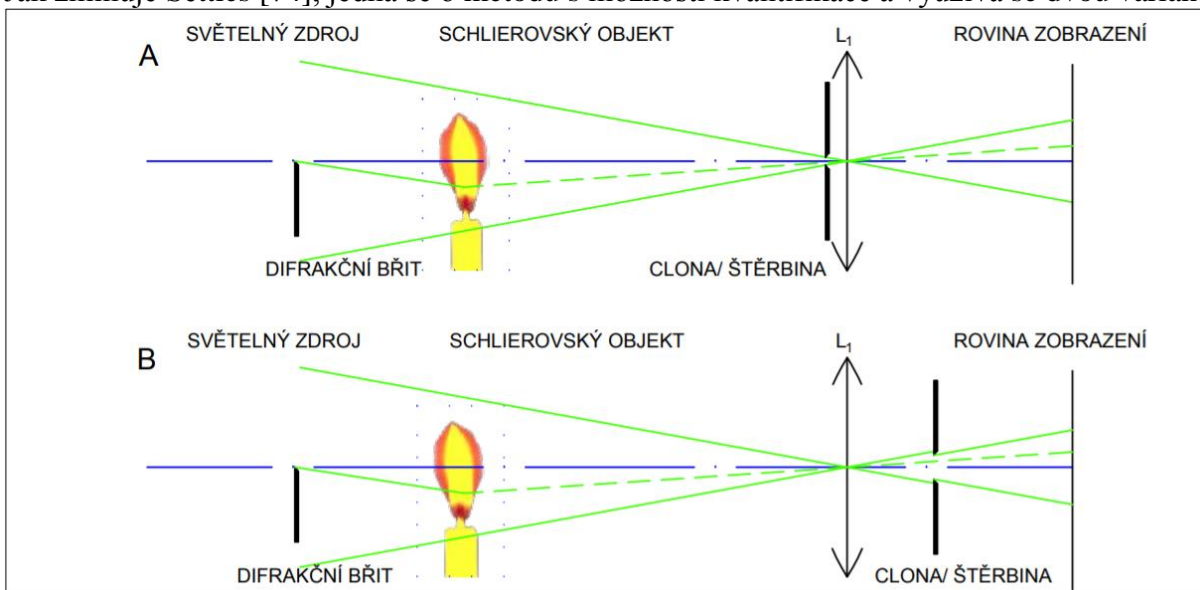


Obr. 44. - Grafické vyjádření vztahu rozměru sestavy s rastrem a její citlivosti.

f - ohnisková vzdálenost zobrazovacího prvku (v metrech); ϵ nejmenším teoreticky detekovatelným úhlem v jednotkách arcs. Převzato z [74].

6.8.6.1 Sestavy využívající difrakčních obrazců jako specifického pozadí

Jak zmiňuje Settles [74], jedná se o metodu s možností kvantifikace a využívá se dvou variant.



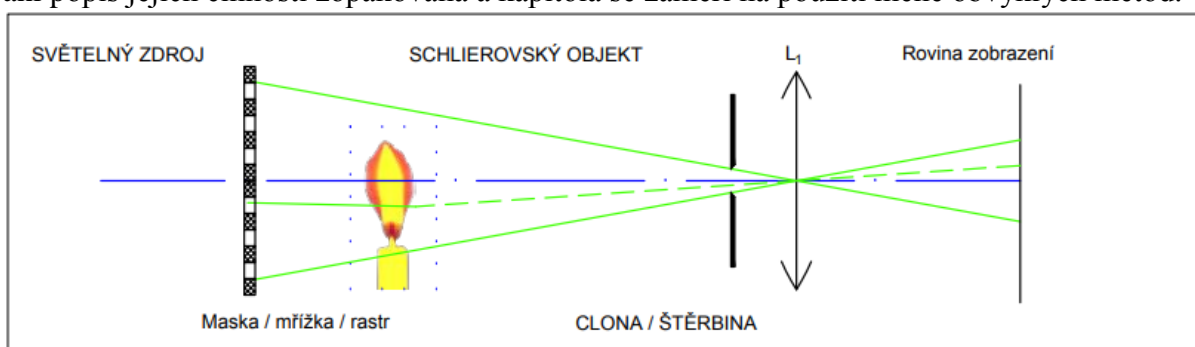
Obr. 45. - Sestava využívající měření na pozadí difrakce

L_1 - zobrazovací čočka; A - s clonou před zobrazovací čočkou. B - s clonou za zobrazovací čočkou.

Na obr. 45 je schlierová sestava využívající měření schlierovského objektu na pozadí (nejčastěji Fraunhoferovy) difrakce. Používá se zde prostorového filtru, realizovaného clonou nebo štěrbinou, k získání schlierového zobrazení. V tomto případě je clona uložena před spojnou čočkou zobrazující do roviny zobrazení. Využití difrakčních obrazců, jako specifického pozadí pro sestavu schlierového zobrazení, je jedním ze způsobů kvantifikace měření. Deformace difrakčního obrazce nese informaci o indexu lomu v testovací oblasti. V případě A je clona uložena za před čočku, v případě B je clona uložena za spojnou čočku zobrazující do roviny zobrazení, přičemž případ A je v literatuře zmiňován častěji, ale více limituje efektivní průměr drtekční oblasti.

6.8.6.2 Sestavy využívající rastrů a jiných kontrastních bodů či ploch jako specifického pozadí

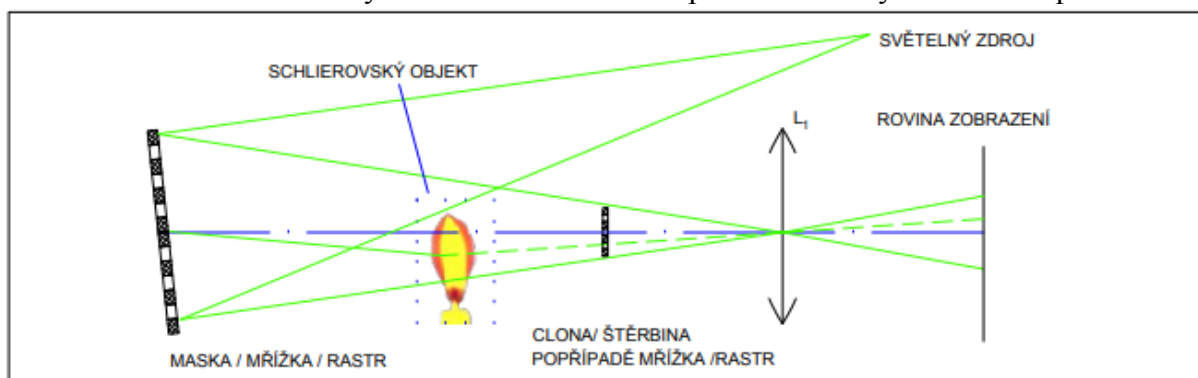
Metody se specifickým pozadím byly zmíněny při popisu prostorových filtrů pro metody se specifickým pozadím v kapitole 6.4.9 *Prostorové filtry metod orientovaných na pozadí* na straně 24 a 25 a schéma sestav je vyobrazeno na obr. 23. V této kapitole proto nejsou schémata ani popis jejich činnosti zopakována a kapitola se zaměří na použití méně obvyklých metod.



Obr. 46. - Sestava se specifickým pozadím a clonou.

Na obr. 46. je vyobrazena metoda orientovaná na pozadí, přičemž světelný zdroj osvětluje rastr. Schlierové zobrazení je v tomto případě dosaženo štěrbinou nebo clonou umístěnou před zobrazovací čočkou L_1 .

Pro zobrazení velmi rozsáhlých drtekčnicích oblastí se používá metody s reflexním pozadím.



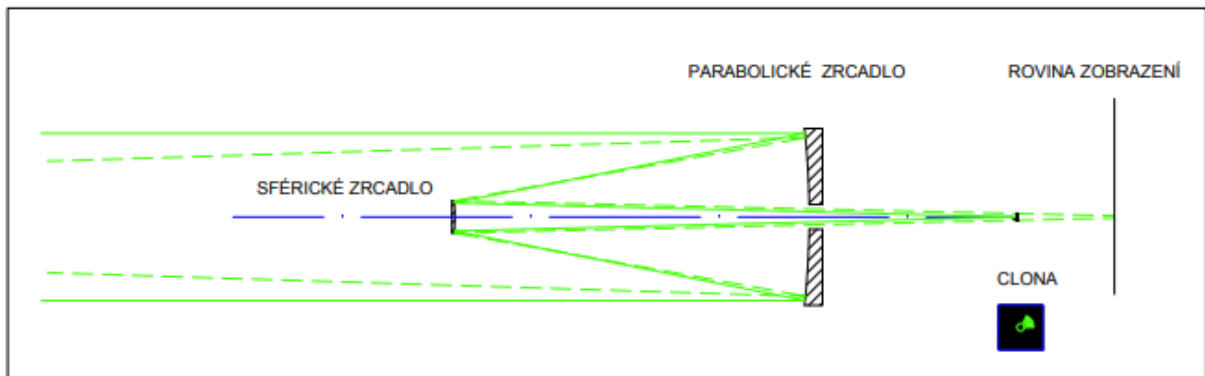
Obr. 47. - Sestava s reflexním rastrem.

Na obr. 47. je zobrazena metoda využívající reflexního pozadí. Sestava je osvětlena silným světelným zdrojem. Schlierové zobrazování se dosáhne začleněním komplementárního či shodného rastru v odpovídajícím měřítku, nebo použitím clony. Sestava s reflexním rastrem je velmi vhodná pro zobrazování velkých ploch. Její citlivost je relativně nízká, Settles [74] uvádí nejvýše 9 arcsec (9'). Výhodou je velikost detekčního pole, které můžeme realizovat řádově v metrech. Sestava vyžaduje poměrně velké prostory.[73], [74]

6.8.7 Schlierové zobrazení teleskopem a projevy schlierovských objektů při užití teleskopu

Pro schlierové zobrazení je podstatný tvar clony umístěvané do ohniska teleskopu. Clona má tvar prstencové výseče, přičemž cloní průchod neovlivněných svazků. Typicky se cloní 80 - 100 % neovlivněných svazků. Cloní-li se 100 % neovlivněných svazků, jedná se o metodu temného pole popsanou v kapitole 6.4.2.1. Pozorování teleskopem je jednou ze speciálních metod. Zaměřuje se obvykle na pozorování proudění vzduchu a rázových vln kolem letounů za letu a jiných rychle letících objektů. Zdrojem světla je nejčastěji slunce, nebo měsíc. Využívá se schopností moderních teleskopů sledovat trajektorii objektů automaticky. Velmi specifickou

aplikací je také použití adaptivní optiky. Schlierovským objektem je v tomto případě atmosféra a využívá se specifického pozadí (laserem uměle vytvořeného zářivého bodu ve svrchních oblastech atmosféry). Cílem adaptivní optiky teleskopu je potlačit projevy schlierového zobrazení při pozorování kosmických těles a úkazů.



Obr. 48. - Schlierové zobrazení teleskopem.

6.8.8 Mikroskopové metody

Významnou a vysoce specifickou oblastí použití jsou metody používající mikroskop. Schlierového zobrazování se zde používá ke zvýšení kontrastu zobrazení vzorku a zdůraznění jeho prostorové povahy. Principy schlierového zobrazování s "fázovým břítem" v mikroskopii poprvé použil Frist Zernike, který za svou práci v této oblasti dostal roku 1953 Nobelovu cenu za fyziku. Mikroskopové metody dnes nejvíce využívají fázový, nebo polarizační schlierový filtr. [89]

6.9 Citlivost a vyhodnocení měření

Základní analýza a vyhodnocení spočívá v rekonstrukci úhlu odchýlení ε . Ten je možno vyhodnotit na gradient indexu lomu, (nebo hustoty, či tlaku). Další důležité parametry jsou kontrast zobrazení a citlivost. Citlivost je jednou ze základních charakteristik metody. Pro zavedení citlivosti se omezíme na případ 2D schlierovského objektu v rovině \mathbf{xy} . Citlivost sestavy s vybraným zdrojem světla a filtrem schlierového zobrazení spoluurčuje geometrické limity. Pro určení citlivosti, nebo minimálního pozorovatelného úhlu ε_{min} , jsou podstatná následující kritéria; průměr zobrazovací čočky, poloha objektu, maximální úhel odchýlení, citlivost kamery a typ použitého schlierového filtru či bříty. Citlivost s důrazem na typ použitého schlierového filtru byla předestřena již v kapitolách 6.4.1 na straně 13. a 6.5.2 na straně 26.[74], [82], [65], [30]

6.9.1 Citlivost a kontrast zobrazení

Hlavním kritériem citlivosti je měřitelná dislokace ovlivněného svazku popsána v kapitolách 6.2 a 6.4. Ta je dána parametry sestavy a schlierovského objektu. Sestava schlierového zobrazení je schopna zobrazit jen určitý interval odchýlených paprsků, a proto se omezíme na interval měření $\langle \varepsilon_{min}, \varepsilon_{max} \rangle$, přičemž je nutno opět zdůraznit, že tento popis nelze provádět spolehlivě zcela obecně (bez specifického přístupu k řešení pro zvolenou sestavu, včetně zobrazovacího prvku L_2 , světelný zdroj a filtr schlierového zobrazení, i parametry schlierovského objektu), jak bylo nastíněno v kapitolách 6.3, 6.4, 6.5. Nejprve je nutno určit ε_{min} , které lze stanovit z předpokladu, že nemá vykazovat ztrátu informace. Pak platí, že filtrem musí projít celý příslušný rozměr zdroje (výška zdroje = h , šířka zdroje = b) dislokovaný o a_ε nejmenším úhlem ε_{min} v příslušném směru. Pro rozměr zobrazení zdroje v prostoru bříty h' platí [65]:

$$h' = \frac{f_2}{f_1} \cdot h \quad (65).$$

Vztah mezi rozměrem obrazu zdroje a jeho dislokací byl popsán rovnicí (24) na straně 12. Pro jednoduchost na příkladu uložení bříty v místě fokusu lze úhel ε_{min} vyjádřit například:

$$\varepsilon_{min} = \frac{h' - a}{f_2} = \frac{a_\varepsilon}{f_2} \quad (66).$$

Při stanovení maximálního úhlu se vychází z geometrických vlastností soustavy (průměr zobrazovacího objektivu $\phi(L_2)$ a podobně):

$$\varepsilon_{max} = \frac{\phi(L_2)}{f_2} \quad (67).$$

Kontrast zobrazení je důležitým parametrem sestavy a je určen pomocí jasů. K posouzení kontrastu je více přístupů. Budou uvedeny dva. Michelsonův kontrast C_M (někdy též nazýván stupeň viditelnosti):

$$C_M = \frac{B_{max} - B_{min}}{B_{max} + B_{min}} \quad (68),$$

kde B_{max}, B_{min} - maximální a minimální jas.

Michelsonův kontrast měří vztah mezi rozptylem a součtem dvou jasů. Používá se obvykle v teorii zpracování signálu k určení kvality signálu vzhledem k jeho hladině šumu.

Weberův kontrast C_W , který je rozdílem mezi dvěma jasy vydělen nižší jasem:

$$C_W = \frac{B_{max} - B_{min}}{B_{min}} \quad (69),$$

kde B_{max}, B_{min} - maximální a minimální jas.

Settles [74] k zavedení citlivosti přistupuje vyjádřením kontrastu zobrazení. Při určení kontrastu zobrazení aplikuje Weberův přístup k určení kontrastu (65).

Intenzita osvětlení v detekční oblasti E_0 osvětlené zdrojem:

$$E_0 = \frac{B \cdot b \cdot h}{m^2 \cdot f_1^2} \quad (70).$$

Zde je B - jas zdroje, m - zvětšení, f_1 ohnisko prvního prvku L_2 . Intenzita osvětlení neovlivněných svazků E průchozích přes břit:

$$E = \frac{B \cdot b \cdot a}{m^2 \cdot f_1 \cdot f_2} \quad (71).$$

Zde je f_2 - ohnisková vzdálenost zobrazovacího prvku, a - rozměr nezacloněné části zdroje.

Intenzita osvětlení ovlivněných svazků ΔE průchozích přes břit. Při horizontálním uložení břitu:

$$\Delta E = \frac{B \cdot b \cdot \varepsilon_y}{m^2 \cdot f_1} \quad (72).$$

Kontrast zobrazení C :

$$C = \frac{\Delta E}{E} = \frac{f_2 \cdot \varepsilon_y}{a} \quad (73).$$

Kontrast zobrazení lze udávat v procentech a závisí na úrovni zaclonění. Citlivost je obecně dána vztahem mezi změnou vstupní veličiny a změnou výsledku, V případě schlierových metod lze použít vztažení kontrastu zobrazení k úhlu vychýlení paprsku vlivem schlierovského objektu. Výpočet citlivosti S :

$$S = \frac{dC}{d\varepsilon} \approx \frac{f_2}{a} \quad (74).$$

Citlivost se běžně vyjadřuje pomocí nejmenšího detekovatelného úhlu ε_{min} , nebo se vztahuje na jednu úhlovou sekundu $d\varepsilon \approx 1''$. Často se využívají také sestavy s jedním zrcadlem, pro které lze také aplikovat rovnice (70)-(74), ale v tomto případě bude f_1 rovno ohnisku zrcadla a f_2 rovno ohnisku objektivu zobrazujícího schlierovský objekt, jak zmiňuje například W. Hosh a J. P. Waltres [38]. Ke stanovení citlivosti je možno přistoupit i jiným způsobem. Za předpokladu, že není cílem získat 100% informace, ale dobré kontrastní zobrazení, lze nejprve stanovit požadovanou citlivost či kontrast ve výsledném zobrazení a určit minimální úhel odchýlení na schlierovském objektu, který bude pozorovatelný, při zvoleném zaclonění jak zmiňuje [74].

Pro fázovou citlivost (fázového filtru) uvádí L. A. Vasilev [90] vztah (52), jak bylo zmíněno v kapitole 6.5.2 na straně 26, který je pro přehlednost uveden opakovaně také zde:

$$S_{fáz} = \frac{2 \sin(\Delta\varphi)}{\sqrt{p_\lambda}} \quad (75).$$

Přičemž $S_{fáz}$ je citlivost na změnu fáze, $\Delta\varphi$ - fázový posuv, p_λ - pokles amplitudy vstupní vlny průchodem vlny skrze fázový filtr.

Nejistota plynoucí ze zobrazení digitální kamerou je dána Nyquistovým-Shannonovým vzorkovacím teorémem. Vzorkovací frekvence tedy musí být alespoň dvojnásobná než rozměr. Každý nejmenší detekovatelný bod $\mathcal{B} \approx 1\text{px}$ tedy vyžaduje alespoň 2 px pro svůj záznam. Nejmenší vzdálenosti právě detekovatelných bodů musí být větší než kritérium:

$$\mathcal{B}_2 - \mathcal{B}_1 > |2 \text{ px}| \quad (76).$$

Zde $\mathcal{B}_2 - \mathcal{B}_1$ - vzájemná poloha dopadajících bodů na záznamový CCD čip, 1px - rozměr pixelu, jinak nastane antialiasing. Označíme-li toto kritérium nejmenšího detekovatelného rozdílu jako $d(\mathcal{B}_2 - \mathcal{B}_1)$, pak lze vyjádřit nejistotu polohy dvou bodů vzdálených $\mathcal{B}_2 - \mathcal{B}_1$:

$$\delta\varepsilon = \varepsilon \frac{d(\mathcal{B}_2 - \mathcal{B}_1)}{(\mathcal{B}_2 - \mathcal{B}_1)} \quad (77).$$

přičemž $\delta\varepsilon$ je nejistota určení úhlu.

S ohledem na Nyquistovým-Shannonovým vzorkovacím teorémem uvádí Setles [74] pro citlivost záznamu na kameru

$$S = \frac{B_2 - B_1}{d\varepsilon} \quad (78).$$

Přičemž vzájemná vzdálenost bodů $B_2 - B_1 > 2px$, takovéto kritérium ale nezohledňuje konečný rozměr detekovaného bodu. J. P. Waltes [38] zmiňuje, že pro bezpečnou detekci je nutné zajistit menší průnik bodů než 20 %.

6.9.2 Analýza objektu

Při analýze objektu vyjdeme z rovnic (11) a (12) uvedených v kapitole 6.2.1. Pro přehlednost jsou opakovaně uvedeny také zde:

$$\varepsilon_x = \frac{L}{n_0} \cdot \frac{\partial n}{\partial x} \quad (79),$$

$$\varepsilon_y = \frac{L}{n_0} \cdot \frac{\partial n}{\partial y} \quad (80),$$

kde L je rozměr schlierového objektu ve směru osy z . Z rovnic (72), (78) a (79) lze vyjádřit kritérium, (minimální pozorovatelný kontrast C_p) v souladu s parametry kamery. Pak vyvodíme, že pro minimální pozorovatelný gradient indexu lomu bude platit:

$$\frac{\partial n}{\partial y_{min}} = \frac{C_p \cdot n_0 \cdot a}{L \cdot f_2} \quad (81).$$

$$\frac{\partial n}{\partial x_{min}} = \frac{C_p \cdot n_0 \cdot a}{L \cdot f_2} \quad (82).$$

Nejistota při analýze objektu spočívá zejména v nejistotě trasování paprsku během průchodu objektem:

$$\delta\varepsilon_y = \frac{L^2 \partial^2 n}{12 \partial y^2} \quad (83),$$

$$\delta\varepsilon_x = \frac{L^2 \partial^2 n}{12 \partial x^2} \quad (84).$$

kde L je rozměr schlierovského objektu a $\delta\varepsilon_y$, $\delta\varepsilon_x$ jsou nejistoty určení úhlu po průchodu schlierovským objektem. Celkovou nejistotu pak určujeme součtem všech dílčích nejistot pro úhel odchýlení ε a odtud pak pro gradient indexu lomu.

6.10 Využití

Schlierové metody mají rozsáhlé praktické použití v oblastech mechaniky tekutin, mikroskopii, při studiu rázových vln, chemických reakcí, ale i v optice, geologii, biologii, stavebního a strojního inženýrství.

6.10.1 Mikroskopové metody

Rozsáhlá oblast využití schlierových metod. V mikroskopii napomáhají zvyšovat kontrast zobrazení zkoumaného preparátu. Specifiky tohoto využití jsou velmi malá detekční oblast a velký gradient v zobrazovaném schlierovském objektu (typicky se jedná o plochu rozhraní dvou objektů s různým indexem lomu).

6.10.2 Rázové vlny při proudění s rychlostí nad 0,5 Mach

Jedná se o pozorování dějů (proudění z trysky, nebo obtékání těles) při rychlostech blízcích se rychlosti zvuku, nebo při nadzvukových rychlostech. Problematika je obsáhle rozebrána v [87]. Uplatnění tohoto typu měření je především v leteckém, raketovém, ale i automobilovém průmyslu, při konstrukci vysokotlakých a středotlakých turbín a podobně. [84]

6.10.3 Proudění, změny tlaku teploty a hustoty

Studium laminárního a turbulentního proudění, obtékání těles průhlednou kapalinou, studium distribuce a směru rychlostí v takovém prostoru je jedním z uplatnění schlierových metod. Často se v tomto případě převádí gradient indexu lomu na gradient jiné veličiny. Pro převedení gradientu indexu lomu na gradient hustoty se používá Gladstone-Daleův vztah:

$$n - 1 = K \cdot \rho \quad (85).$$

Zde K je takzvaný Gladstone-Dale koeficient (měrná refraktivita) s hodnotou pro vzduch za standardních podmínek $K = 226 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$. Pro vyjádření je možno použít jeho upravenou variantu:

$$\frac{n - 1}{\rho} = K \cdot (1 + \beta T) \quad (86).$$

Přičemž β je součinitel objemové tepelné roztažnosti, T - termodynamická teplota. [21]

Specifickou oblastí studia je zviditelnění zvukového vlnění. Uznávaným odborníkem na tuto problematiku je W. Rueckner [14]. Základem je použití kvalitního zdroje akustických vln, bez výrazného vlivu vyšších harmonických frekvencí. Pro zachycení zobrazení vlny ve volném prostoru je také nutno využít stroboskopu coby zdroje světla. Frekvence spínání světelného zdroje přitom musí být stejná jako frekvence zvuku tak, aby došlo k efektu zviditelnění zvukové vlny statické v prostoru. Je možné také synchronní frekvenci rozladit pro získání efektu zobrazení "pohybu vlny" prostorem, v tomto případě se používá změna frekvence o méně než 5 %. Pro generování akustické vlny se obvykle používají ultrazvukové zářiče 18-40 kHz. [101]

6.10.4 Analýza plazmatu

V současné době je často využívanou technickou aplikací analýza proudění, teploty, složení a chování plazmatu. [21], [90] Vyjádření vlivu ionizovaných částic na index lomu:

$$n^2 = 1 + \frac{e^2 \cdot N}{m_e \cdot \varepsilon_0 \left(\left(\frac{c}{\lambda} \right)^2 + f_v^2 \right)} + \frac{e^2}{m_e} \sum_{i,k} N_i \frac{\varepsilon_{k,i}}{\left(\frac{c}{\lambda} \right)_{k,i}^2 - \left(\frac{c}{\lambda} \right)^2} \quad (87).$$

Zde N - koncentrace volných elektronů, N_i - koncentrace iontů, atomů a molekul, e - náboj elektronu, m_e - hmotnost elektronu, k - absorpční čára částice i , $\varepsilon_{k,i}$ - energie příslušného přechodu kvantových stavů, c - rychlost světla, λ - vlnová délka použitého světla, f_v - frekvence kolizí volných elektronů s částicemi. [90]

6.10.5 Pozorování kinetiky chemických reakcí

Studována je interakce látek, jež mají různý index lomu a to mísením (pozorování difuze a určování koncentrace), nebo studiem a řízením reakční kinetiky. Pro mísení dvou kapalin je stěžejní určení refrakce R i složek $\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2$ a koncentrace složek směsi κ_1, κ_2 řešením soustavy:

$$\mathcal{R} = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \left(\frac{\bar{M}}{\rho} \right) = \kappa_1 \cdot \mathcal{R}_1 + \kappa_2 \cdot \mathcal{R}_2 \quad (88).$$

přičemž \bar{M} - průměrná hmotnost roztoku, ρ - jeho hustota a n - index lomu. Odtud lze vyvodit:

$$\kappa_1 = \frac{\mathcal{R} - \mathcal{R}_2}{\mathcal{R}_1 - \mathcal{R}_2} \quad (89).$$

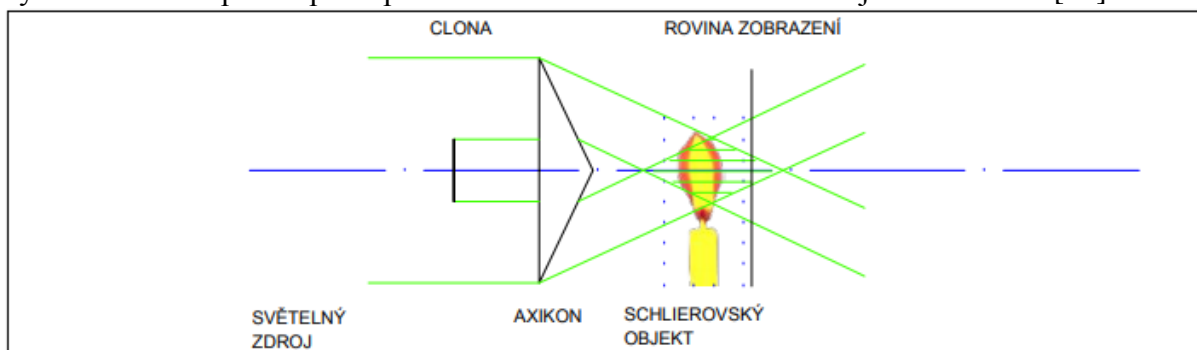
Pro plynné směsi při tlaku plynu p lze vyvodit:

$$(n - 1) \cdot p = (n_1 - 1) \cdot p_1 + (n_2 - 1) \cdot p_2 \quad (90),$$

kde p_1 a p_2 jsou parciální tlaky a n_1, n_2 indexy lomu složek směsi. Příkladem použití schlierových zobrazovacích metod může být studium specifických směsí a určování stupně disociace dusíku. [90]

6.10.6 Využití schlierových technik a principů v mesooptice

Průkopníkem mesooptického zobrazení byl Soroko [80], [79], [81]. Mesooptické zobrazení využívá kolimovaného svazku paprsků a oddělení paraxiálních paprsků od paprsků ve větší vzdálenosti od optické osy. V detekční oblasti se svazky vzdálenější od optické osy kříží. Pro vyhodnocení lze použít principů schlierového zobrazení což zmiňuje také Smeets [77].



Obr. 49. - Příklad mesooptické sestavy.

Světelný zdroj musí být koherentní; sestava uvedena v [79], [81].

Na obr. 49 princip mesooptického zobrazení - axikon dělí kolimovaný svazek na dvě poloviny (dva svazky), které prochází detekční oblastí. V detekční oblasti dochází k interferenci obou vzniklých svazků. Mesooptické zobrazovací metody mají široké použití v analytické chemii nebo jaderné fyzice. Je možné například určovat koncentrace a vzájemné poměry některých izomerů organické a v menší míře i anorganické chemie.

7 Realizace praktické části a vyhodnocení měření

Praktická část byla zpracována dvěma principiálně odlišnými metodami schlierového zobrazení. V kapitole 7.1 jsou definovány kritéria, na základě kterých byly voleny sestavy pro realizaci měření. V kapitole 7.2, 7.3 jsou popsány realizace sestav a výsledky měření a kapitola 7.4 byla věnována srovnání měření na obou sestavách a hodnocení možností jejich použití i s ohledem na naznačení didaktického využití.

7.1 Výběr sestav

Při výběru sestav bylo zohledněno, že by měly být použitelné ve výukovém procesu. Proto byly zvoleny některé dodatečné požadavky.

- Velikost zobrazované oblasti: při běžné výuce jsou rozměry demonstračních experimentů ve fyzice zpravidla nebývají několik milimetrů, ačkoli v praxi je velké množství přímých aplikací schlierové metody zaměřeno na přesný popis rozložení indexu lomu ve velmi malé oblasti. Pro názornost při výuce na základních, nebo středních školách je vhodné, aby byl schlierovský objekt řádově o rozměrech centimetrů až desítek centimetrů. Pro výuku na vysokých školách to není podmínkou, zde se snažíme o maximální přiblížení reálným aplikacím.
- Kontrast zobrazení a světelnost: pro využití schlierových technik k prezentování dějů je nezbytné, aby byly děje dobře pozorovatelné a jejich interpretace alespoň z části intuitivní. Jedině tak je možné dosáhnout zvýšení didaktické efektivity experimentem. Pro potřeby měření je pak dobrý kontrast zobrazení stěžejním základem pro úspěšnou kvantifikaci naměřených dat a jejich interpretaci ve formě rozložení nehomogenit indexu lomu, eventuálně přepočít gradientu indexu lomu na jinou, související veličinu jako je teplota, nebo hustota.
- Mobilita: v případě laboratorní sestavy mobilita nehraje roli. Jedná se o co nejkvalitnější měření, nebo o nejnázornější videozáznam. Pokud by měla být sestava použita jako přímý demonstrační experiment ve výuce, bylo by velmi žádoucí, aby sestava byla mobilní. Opatrným transportem by neměla utrpět poškození a její dodatečná justáž by musela být dostatečně jednoduchá tak, aby ji učitel mohl nechat přemístit do výuky a měl dost času sestavu seřadit pro potřeby experimentu během přestávky.
- Tvar pole v detekční oblasti: homogenní interferenční pole svazků ve vyšetřovací oblasti pro sestavu navrhovanou s ohledem na možnost kvantifikace (ačkoli kvantifikace měření není cílem této práce). Pro analýzu kapalin, některých experimentů s prouděním a podobně, je nezbytné použít nádob, kyvet a proudovodů. Takové objekty se dají vyšetřovat metodami „of axis“ jen obtížně, protože plochy těchto objektů svazky odráží a vychylují v závislosti na úhlu dopadu.
- Citlivost sestavy: požadavek na citlivost při kvalitativním zobrazení bude stanoven takto: sestava bude citlivá i na slabé schlierovské objekty, jako je teplo stoupající z dlaně.

Pro sestavy realizované v laboratoři bylo zvoleno použití fázového filtru na bázi Wollastonova hranolu, protože interferenční proužky zvýší kontrast zobrazení výsledku. K realizaci byla vybrána Toeplerova sestava (s ohledem na vytvoření homogenního pole světelných svazků v detekční oblasti). Soustavy využívající optických čoček lze realizovat v jedné ose. Výsledky získané touto sestavou jsou porovnávány s výsledky na zrcadlové sestavě „of axis“ s jedním sférickým zrcadlem o průměru 22 cm a ohniskovou vzdáleností $f = 1,25$ m využívající prostorového břitu.

7.2 Realizace sestavy s fázovým filtrem

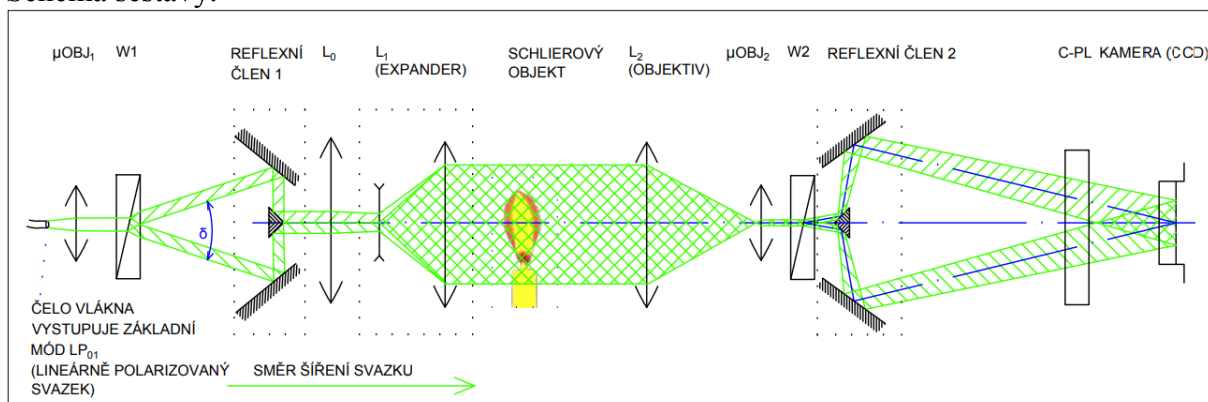
Zvolená realizovaná sestava se vyznačuje množstvím specifických řešení a několika obecnými poznatky, které nebyly uvedeny v kapitole 6.5 a souvisejících podkapitolách. V následující kapitole 7.2.1 je úvodem popsána činnost sestavy. Následně je zmíněna interference ordinárního a extraordinárního svazku dopadajícího na detektor kamery. Je zmíněna kontrola vlastností interference na kameře při zvoleném sestavení a naznačen příklad možného trasování paprsků interferujících na hraně schliery jak ji zmiňuje J. Sequens [72]. Následuje naznačení výpočtu citlivosti a popis vlastností světelného zdroje. V kapitole 7.2.2 je rozveden postup při realizaci sestavy a technická dokumentace použitých prvků.

7.2.1 Specifika praktického provedení sestavy

Při výběru metod bylo zohledněno několik kritérií. Sestavu, nebo alespoň detekční prostor stavět v jedné optické ose, ověřit Toeplerovu konstrukci se dvěma objektivy a homogenními světelnými svazky mezi nimi a ověřit použití Wollastonova hranolu ke konstrukci fázového filtru.

Při návrhu sestavy zobrazující projevy změn indukovaných schlierovským objektem vycházela řešení v této práci zejména z publikací G. Smeets a A. George [77], [76], G. S. Settles [74], [31] J. Sequens [72] a M. Hugenschmidt [41]. Hugenschmidt dokazuje výhody využití kratších vlnových délek a zvyšující kontrast zobrazení a Wollastonovým hranolem s velkým deviačním úhlem, který jsme použili. Autoři G. Smeets a A. George volili, s ohledem na dobovou úroveň techniky, jako zdroj dva nezávislé zdroje bílého světla (jiskrové výboje) a jako detekční médium fotografický papír. V této práci bylo použito zdroje koherentního laserového záření obdobně jako u M. Hugenschmidta, a Foveon X3 vrstevnatý snímač kamery. Monochromatické záření o známé vlnové délce je výhodné ke kvalitativnímu i kvantitativnímu měření indukovaných schlierovských jevů. Možnosti využití dvou Wollastonových hranolů ke zvýšení kontrastu zobrazení a pro realizaci fázových kontrastních metod jsou v literatuře dobře popsány. Použití fázového kontrastu demonstroval již Frist Zernike, který za svou práci v této oblasti dostal roku 1953 Nobelovu cenu za fyziku. Pro elegantní úpravu chodu polarizovaných svazků za Wollastonovými hranoly a jednoznačné možnosti justáže byly využity pro své vlastnosti takzvané “reflexní členy”. [24], [81]

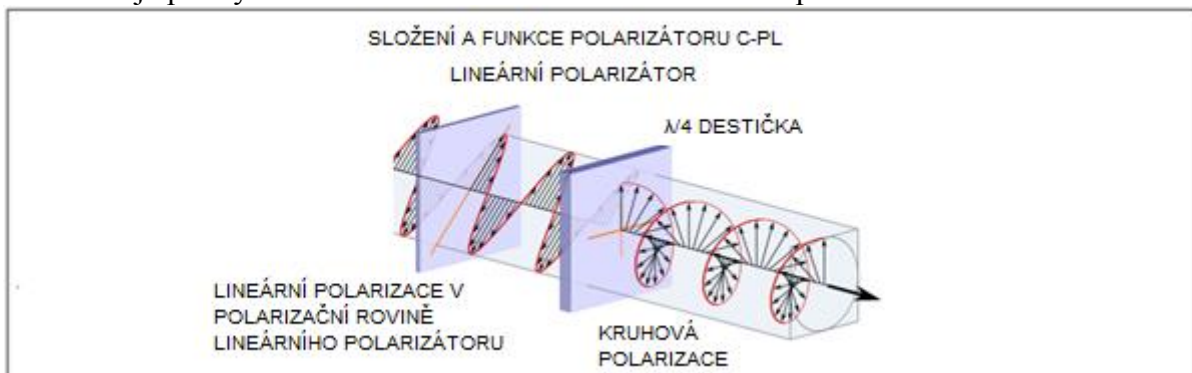
Schéma sestavy:



Obr. 50. - Schéma realizované sestavy s fázovým filtrem:

$\mu OBJ1$, $\mu OBJ2$ - kolimační (mikroskopové) objektivy; $W1$, $W2$ - Wollastonovy hranoly; REFLEXNÍ ČLEN 1, REFLEXNÍ ČLEN 2 - sestava zrcadel upravující chod svazků [24]; L_0 - korekční spojná čočka; $L1$ (EXPANDER) - Expander; $L2$ (OBJEKTIV) - objektiv; C-PL - kruhový polarizátor; KAMERA (CCD) - kamera.

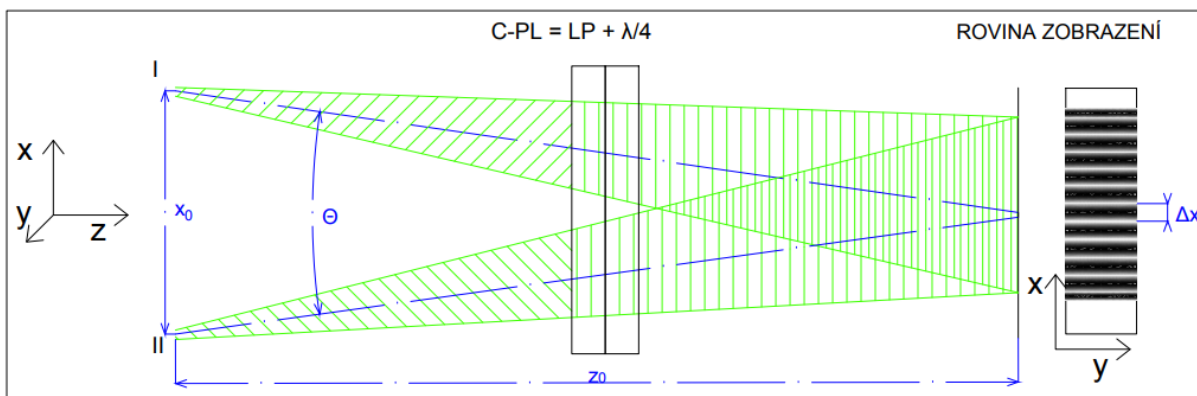
Z čela vlákna vystupují v jednom kolineárním svazku paprsky dvou vlnových délek (473 nm a 532 nm) v základním LP₀₁ módu, jak je dále popsáno v kapitole 7.2.1.5. Stav polarizace tohoto lineárně polarizovaného svazku je takový, že se svazek šíří v rovině polarizace stočené o 45° vůči nastaveným rovinám polarizace Wollastonova hranolu (ordinerního a extraordinerního svazku). Proto Wollastonův hranol W1 vytvoří svazek ordinerní a extraordinerní o shodné intenzitě světla. Směr šíření obou svazků je upraven tak, aby bylo možné oba svazky expandovat prvkem L₂ (expander). Za expanderem vzniká a detekční oblastí prochází homogenní pole kolineárních, komplementárních vzájemně kolmo polarizovaných svazků, jeden je polarizovaný horizontálně a druhý polarizovaný vertikálně. Vlivem vnějšího fyzikálního působení (schlierovským objektem indukovaný gradient indexu lomu) se může ovlivnit polarizační stav, fáze i optická dráha. Následně je upraven chod svazků tak, aby byl částečně zkolimovaný na Wollastonův hranol W2. Po průchodu svazků Wollastonovým hranolem W2 se svazky separují v závislosti na rovině polarizace. Všechny svazky procházejí přes kruhový polarizátor C-PL. Použitý polarizátor C-PL (“cirkular polarizator”) je tvořen lineárním polarizátorem a $\lambda/4$ destičkou, která změní lineární polarizační stav na kruhový, jak je naznačeno na obr. 51. Polarizátor filtruje část intenzity příchozích svazků, čímž zlepšuje kontrast zobrazení interferencí na hranách schlier [72], které tvoří část informace obsažené v záznamu měření a s Wollastonovým hranolem tak tvoří fázový filtr někdy označovaný jako „fázový břit“. Polarizátor C-PL natočením roviny polarizace vůči rovinám polarizace ordinerního a extraordinerního svazku vystupujících z Wollastonova hranolu W2 zajistí poměr intenzity obou svazků 50:50 a umožní jejich interferenci. Za polarizátorem C-PL je původně lineární polarizace změněna na kruhovou. Interference svazků v rovině zobrazení (na CCD čipu kamery) převede informaci o získaném fázovém posunu na změnu intenzity světla, která se vyhodnocuje kamerou. Vliv interferencí na hranách schlier a interference svazků v rovině zobrazení je patrný v komentáři obr. 56 na straně 56. Činnost polarizátoru C-PL:



Obr. 51. - Znárodnění složení a funkce kruhového polarizátoru.
Převzato z [101].

Z popisu funkce polarizátoru C-PL vyplývá, že je nezbytné uložit jej do chodu svazků se správnou orientací, tedy tak aby svazky procházely nejprve částí lineárního polarizátoru a následně přes $\lambda/4$ destičku.

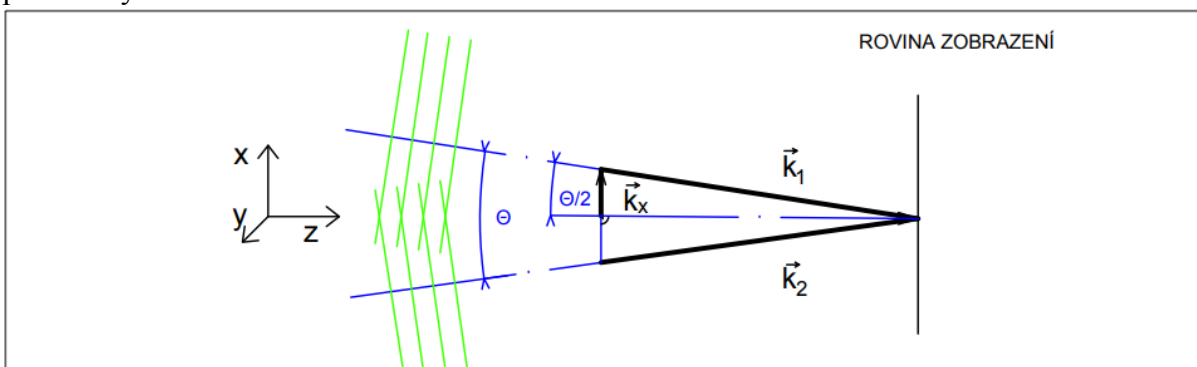
7.2.1.1 Interference komplementárních koherentních svazků shodné vlnové délky, ze dvou směrů



Obr. 52. - Interference záření ze dvou směrů.

Zde x_0 - vzájemná vzdálenost “zdrojů” I, II; Θ - úhel, který svírají interferující vlny; z_0 - vzdálenost od roviny zobrazení; Δx - vzdálenost dvou sousedních interferenčních maxim.

“Zdroje” I a II v obr. 52. vznikly rozdělením dopadajícího záření, podle polarizačního stavu, průchodem přes Wollastonův hranol W2 (obr. 50. na straně 52) na ordinerní a extraordinerní svazek. Polarizátorem C-PL (obr. 51, 52) je zajištěna shodná rovina polarizace i intenzita svazku ze “zdroje” I a “zdroje” II. Proto lze zavést předpoklad, že oba “zdroje” mají stejnou intenzitu, vyzařují světlo jedné vlnové délky, shodně polarizované a jsou symetrické podle osy z , což popisuje situaci za polarizátorem v realizované sestavě. Pak bude pole symetrické podle roviny yz . Úhel, svíraný oběma svazky, leží v rovině xz a modulaci intenzity interferencí lze očekávat v rovině xy v podobě interferenčních proužků. Záznamové médium (kamera) je citlivá na intenzitu záření. Z důvodů lepší přehlednosti je vhodné uvést situaci na obr. 52. s dále používaným značením:



Obr. 53. - Grafický popis veličin při interferenci

Pro velikost vlnového vektoru popisující směr šíření interferujících vln platí:

$$k_x = k_{1x} = k_{2x} \quad (91).$$

Velikosti složky vlnového vektoru k v ose x prvního i druhého “zdroje” se rovnají. Z psané symetrie lze snadno vyvodit:

$$|\vec{k}_x| = \left| \frac{\vec{k}_1 - \vec{k}_2}{2} \right| \quad (92).$$

Analogicky lze psát pro fázový rozdíl $\Delta\varphi$:

$$\varphi_x = \frac{\Delta\varphi}{2} \quad (93).$$

Pro interferující vlny platí, že intenzita je dána:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cdot \cos^2(\vec{k}_x + \varphi_x) \quad (94).$$

Omezíme-li se na popsany případ, kdy obě interferující vlny mají shodnou intenzitu, lze psát:

$$I = 4I \cdot \cos^2(\vec{k}_x + \Delta\varphi) \quad (95).$$

Odtud vyjádříme vztah pro polohu sousedních maxim:

$$\Delta x = \frac{2\pi}{2k_x} = \frac{\lambda}{2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (96).$$

7.2.1.2 Nastavení vhodného úhlu svazků dopadajících na kameru

Z předchozích kapitol je patrné, že se v případě zaměření na schlierové zobrazení je nutné potlačit projevy interference svazků, které nebyly na schlierovském objektu odkloněny od přímého směru šíření, a to tak, že interferenční proužky vznikající mezi dopadajícími svazky budou mít menší vzdálenost sousedních maxim Δx , než činí kritérium Nyquistova- Shannonova vzorkovacího teorému pro použitou kameru s rozměrem pixelu $9,12 \mu\text{m}$:

$$\Delta x = \frac{2\pi}{2k_x} = \frac{\lambda}{2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} < 2 \cdot 9,12 \mu\text{m} \quad (97).$$

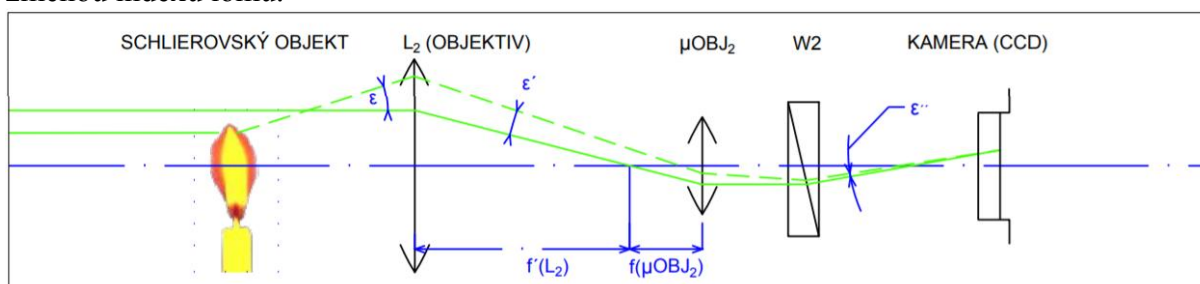
Pro zpracovanou sestavu je úhel, který svírají svazky dopadající na kameru 20° viz obr. 69 v kapitole 7.2.2.2 v popisu reflexního členu 2 na straně 64. Výpočet stačí provést pro vlnovou délku 532 nm :

$$\frac{523 \cdot 10^{-9} \text{m}}{2 \cdot \sin\left(\frac{20^\circ}{2}\right)} = 1.497 \mu\text{m} < 2 \cdot 9,12 \mu\text{m} \quad (98).$$

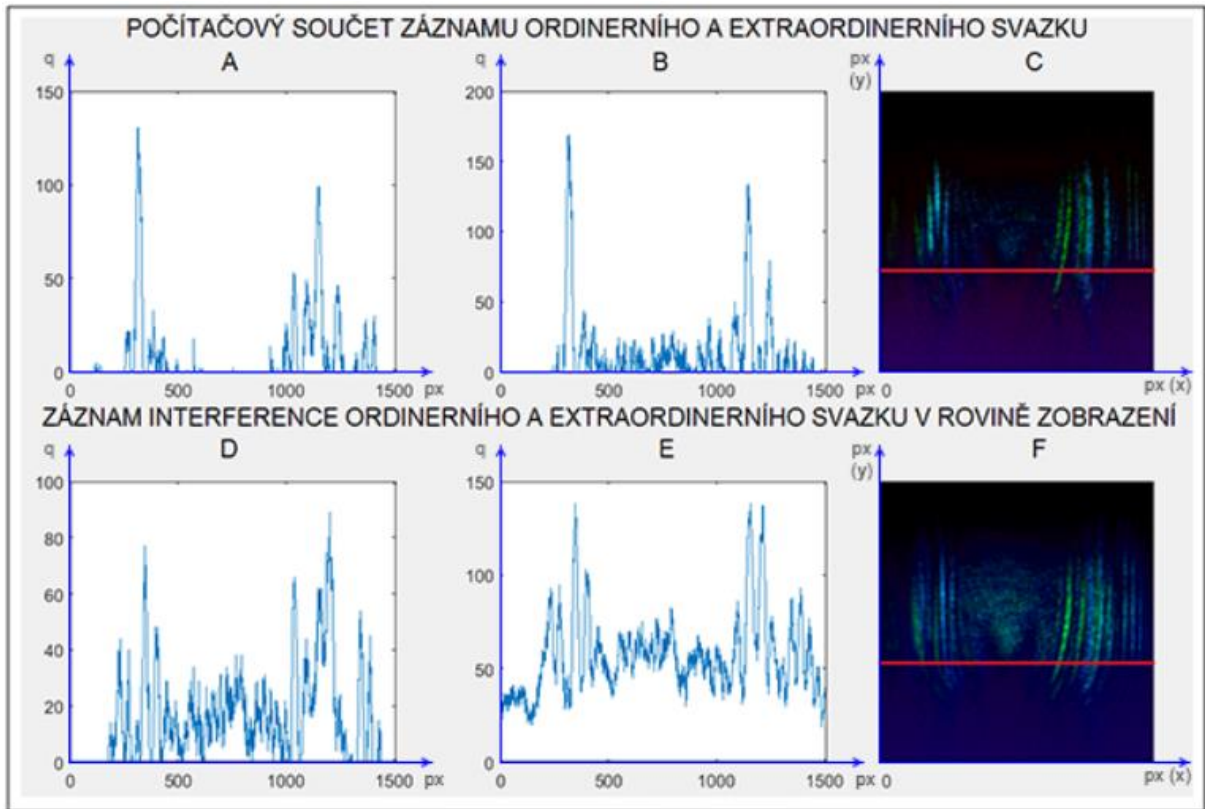
Interferenční proužky na pozadí výsledného zobrazení nebudou patrné. Projevy změn fáze, indukované schlierovským objektem, způsobí v příslušné oblasti interferenčního pole změnou intenzity ve výsledném zobrazení, protože dojde ke změně směru a hustoty interferenčních proužků, kterou bude možno detekovat pomocí analýzy výsledků.

7.2.1.3 Možný přístup ke zpracování výsledků pro použitou sestavu

V této části bude demonstrován výčet vlivů indukovaných schlierovým objektem a analyzován s ohledem na zákonitosti teorie interference a difrakce vlnění. Na vnější hraně schlier dochází k difrakčním jevům a interferenčním jevům. Vyhodnocení zahrnuje i velmi malé vlivy s malou změnou indexu lomu.



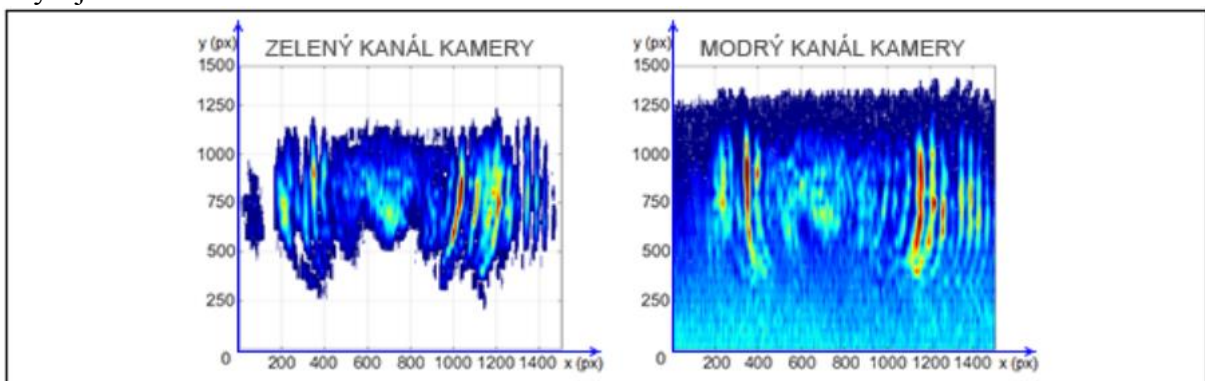
Obr. 54. - Znárodnění chodu paprsků za schlierovským objektem při využití fázového filtru. Zakreslené úhly jsou pouze ilustrační. Značení koresponduje s obr. 50 na straně 52.



Obr. 55. - Příklad možného vyhodnocení měření:

A,D - analýza pro zelený kanál ve zvoleném řezu; B,E - analýza pro modrý kanál; C,D - zobrazení zdroje pro analýzu s vyznačením zvoleného řezu na záznamu červenou čarou.

Vyhodnocení měření obr. 55 bylo provedeno na příkladu výřezu obr. 86 na straně 74. Na obr. 55 vznikl záznam C na počítačovém sečtením dvou výsledků měření. A sice ordinerního svazku (při zastíněném svazku extraordinerním) a extraordinerního svazku (měřeného při zastíněném svazku ordinerním). Takto vzniklá kalkulace popisuje pouze interference na hranách schlier, jak je zmiňuje Sequence [72], tedy interferenční a difrakční jevy které jsou zviditelněné fázovým filtrem realizovaným pomocí Wollastonova hranolu a cirkulárního polarizátoru. Vyhodnocením složek RGB v řezu jsou grafy obr. 55 A - zelený kanál, obr. 55 B - modrý kanál. Záznam obr. 55 F je záznamem měření interference obou svazků za shodných podmínek (ihned po pořízení uvedených dvou záznamů) Vyhodnocením složek RGB v řezu jsou grafy obr. 55 D - zelený kanál, E - modrý kanál. Vzájemným porovnáním grafů obr. 55 A, D a B, F je možno usoudit na projevy interference ordinerního a extraordinerního svazku ve výsledném zobrazení obr. 55 F. Je patrné, že interferenční jevy mezi ordinerním a extraordinerním svazkem výrazně zvyšují kvalitu měření.



Obr. 56. - Vyhodnocení intenzity v záznamu pro modrý a zelený kanál fázového filtru.

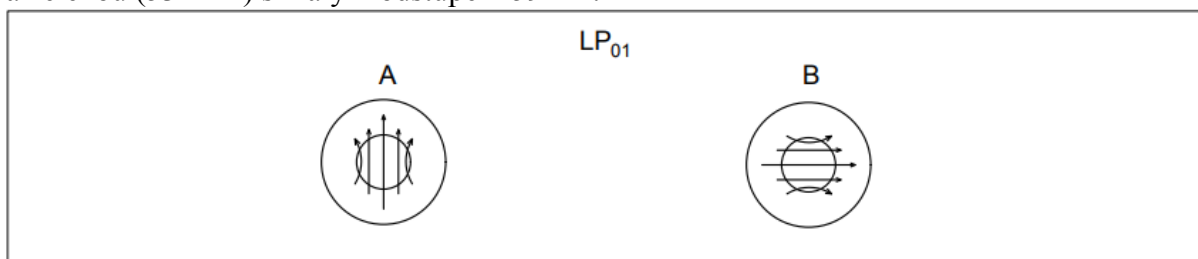
7.2.1.4 Příklad možného přístupu k určení citlivosti a paramerů zobrazení:

Výpočtem citlivosti fázového filtru se zabýval například L. A. Vasilev [90]. Vztah pro výpočet fázové citlivosti byl již uveden v kapitole 6.5.2 *Citlivost fázového filtru* na straně 26 rovnicemi (51), (52) a zopakován v kapitole 6.9.1. *Citlivost a kontrast zobrazení* na straně 47 rovnicí (75). Ve vztahu figurují tyto proměnné: $\Delta\varphi$ - fázový posuv, p_λ - pokles amplitudy vstupní vlny průchodem vlny skrze fázový filtr. V realizované sestavě je použit fázový filtr složený z Wollastonova hranolu a kruhového polarizátoru, jak bylo uvedeno v kapitole 7.2.1 na straně 53. Největší pokles amplitudy v použitém fázovém filtru nastává vlivem stočení roviny kruhového polarizátoru o 45° vůči polarizačním rovinám ordinárního a extraordinárního svazku Wollastonova hranolu. Zde dochází ke snížení amplitudy o 50% pro svazek ordinární i extraordinární.

Dalším podstatným faktorem, ovlivňujícím výsledné zobrazení jsou parametry kamery. Použitá kamera pracuje v 8 bitovém režimu. Snížení amplitudy vstupní vlny v záznamu je normalizovaná spektrální citlivost kamery, kterou lze stanovit z charakteristiky spektrální citlivosti senzoru uvedené v kapitole 7.2.2.2 *Technická dokumentace - sestava pro schlierové zobrazování* na obr. 69 na straně 64: pro $\lambda = 473$ nm: 0,8 V, pro $\lambda = 532$ nm: $p_\lambda = 0,6$.

7.2.1.5 Zdroj lineárně polarizovaného svazku - vedení optickým vláknovým vlnovodem

Jako zdroj světla je použit laserový koherentní zdroj modrého (473 nm) a zeleného (532 nm) zářní, navázaného do optického vláknového vlnovodu. Elektromagnetické světelné záření v optickém jednomódovém vlnovodu vytváří stabilní superponované konfigurace, takzvané módy. Využíváme superpozici základních hybridních módů **HE** a **EH** vytvářející stabilní útvar, takzvaný **LP** mód v základním stavu **LP₀₁**, který je užitečný dvěma navzájem kolnými stavy polarizace. Použitím nastavovacího prvku, takzvaného “polarizačního kontroleru”, je elegantně vybrán požadovaný stav polarizace na výstupu optického vláknového vazebního členu (“coupleru”) pro záření 532 nm a 473 nm. Použitý optický vláknový vazební člen byl zvolen takový, aby byl zajištěn jednomódový režim pro obě vybrané vlnové délky - modrou (473 nm) a zelenou (532 nm) s malým odstupem 59 nm.



Obr. 57. - Polarizační stavy LP_{01} .

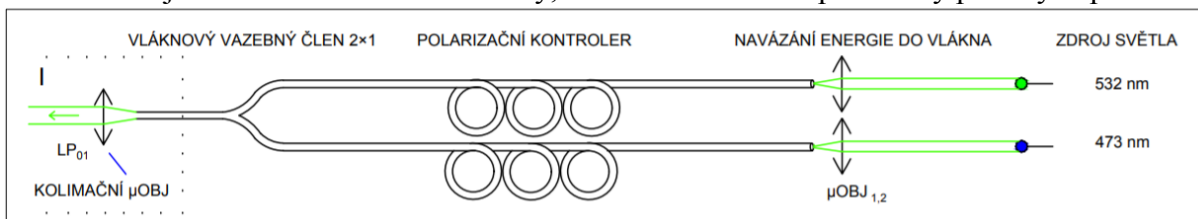
Na obr. 57. je znázornění navzájem kolných polarizačních stavů A a B základního LP_{01} módu. Je nutné zajistit, aby polarizační stav výstupních módů LP_{01} byl pro obě vlnové délky shodný a svíral úhel 45° s polarizačními stavy (rovinami) ordinárního a extraordinárního svazku Wollastonova hranolu $W1$. Svazek LP_{01} je také někdy popisován (charakterizován) jako takzvaný kvazi-gaussovský, což je důležité připomenout pro pochopení dalšího šíření soustavou, poněvadž profil průřezem intenzity svazku má gaussovský charakter. Způsob nastavení vlastnosti svazku na čele vlákna pomocí polarizačních kontrolérů je zřejmý z informací v části *Zdroj lineárně polarizovaného svazku světla* kapitoly 7.2.2.1 - *Technická dokumentace* na straně 59 a 60. [29], [48], [69], [62], [91]

7.2.2 Praktický postup činnosti

Realizace sestavy byla zpočátku inspirována publikací Dual exposure interferometry [77], [76], ve kterém použili autoři G. Smeets a A. George kombinaci tří Wollastonových hranolů. První Wollastonův hranol usměrňuje světlo ze dvou nezávislých nekoherentních zdrojů na vstupní clonu. Při realizaci sestavy byly z tohoto důvodu zařazeny vláknové polarizační kontrolery, pomocí kterých lze nastavit vhodný lineární polarizační stav světelných svazků, bez nutnosti využít Wollastonova hranolu. Za následujícím Wollastonovým hranolem (v práci [77]) mají být svazky vzájemně kolmo lineárně polarizované. V realizované sestavě k tomu slouží Wollastonův hranol W1. Třetí Wollaston (v práci [77], [76]) následně zpětně sloučí oba svazky do jednoho směru. V sestavě realizované v rámci této práce byl použit pro své výhodné optické vlastnosti expander namísto objektivu, umístěný před detekční oblastí, čímž bylo dosaženo podstatně kvalitnějšího homogenního pole v testovací oblasti. Je to však příčinou, proč jsou oba svazky za výstupním Wollastonovým hranolem W2 rozbíhavé a jejich trajektorii je nutno upravit. Svazky jsou tedy komplementární a vzájemně kolmo polarizované. Byla ověřena možnost, kdy provedením jednoho přípravného měření a následně změnou nastavení polarizací za 2. Wollastonovým hranolem přesně o 90° , lze získat doplňkový výsledek. Počítačovým zpracováním by bylo možné oba výsledky sloučit a porovnávat. Tato metoda však nebyla dostatečně citlivá a vlivem množství lámavých ploch docházelo ke značnému zkreslení polí. Při dalším návrhu sestavy byl kladen důraz na výslednou kvalitu interferencí obou svazků, každé vlnové délky. Při realizaci sestavy byly použity takzvané “reflexní členy”, sestavy zrcadel k úpravě směru chodu svazků a použití kolimovaných svazků při průchodu Wollastonovými hranoly. Justáž realizované sestavy je sice náročnější, ale omezení množství lámavých ploch v optické dráze výrazně snižuje problém eliptičnosti průřezu svazků každé vlnové délky.

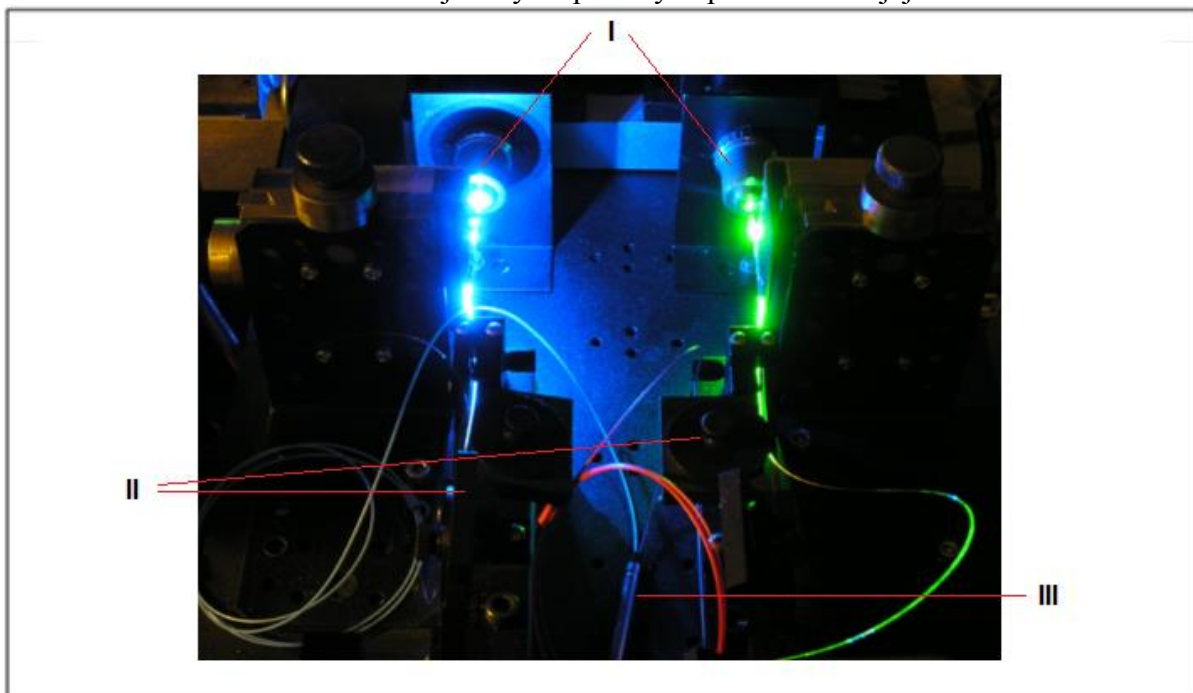
7.2.2.1 Technická dokumentace - zdroj lineárně polarizovaného svazku světla

V této části jsou uvedena chémata sestavy, fotodokumentace a parametry použitých prvků.



Obr. 58. - Schématické znázornění světelného zdroje polarizovaného světla (módu LP₀₁)
I - část sestavy, která je popsána v následující kapitole (7.2.2.2)

Fotodokumentace světelného zdroje a výčet použitých prvků včetně jejich vlastností:



Obr. 59. - Fotografie uspořádání světelného zdroje polarizovaného světla (módů LP_{01}). Světlo z polovodičových laserů je navázáno do optického vlákna. Pojmenování prvků koresponduje s vyobrazením sestavy na obr. 58.

I - objektivy $\mu OBJ_{1,2}$; II - POLARIZAČNÍ KONTROLER; III - VLÁKNOVÝ VAZEBNÝ ČLEN 2×1 .

- Zdroj světla

Jako zdroje světla byly použity lasery modrý (473 nm) a zelený (532 nm).

- Navázání energie do vlákna

Energie světla každého zdroje byla navázána pomocí mikroskopového objektivu - $\mu OBJ_{1,2}$, se zvětšením $10\times$.

- Polarizační kontrolér

V sestavě byly použity dva identické polarizační kontroléry Thorlabs FPC030 [100]:

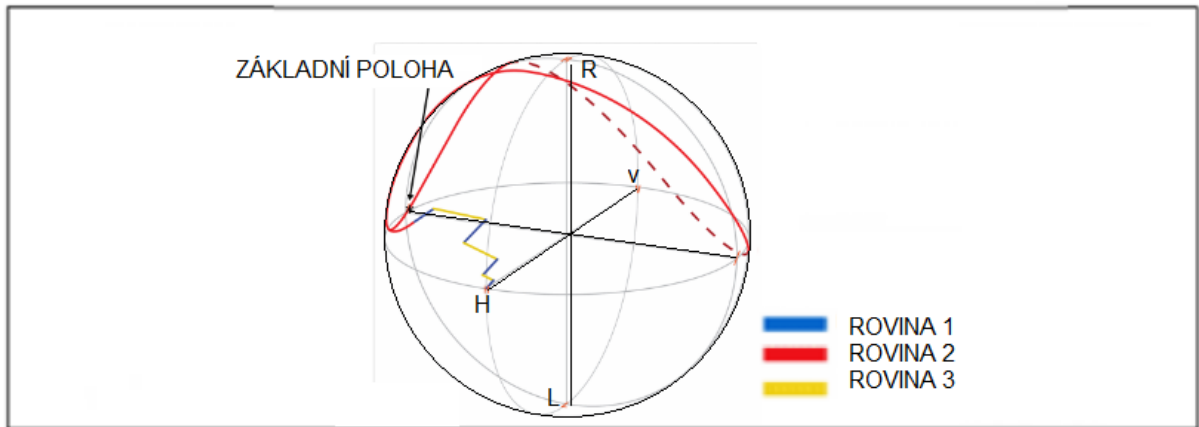


Obr. 60. - Použitý polarizační kontrolér s obecným nastavením rovin.

Převzato z [100].

Činnost polarizačního kontroleru:

Žádaným stavem na výstupu vláken je lineární polarizace skloněná 45° vůči polarizačním rovinám Wollastonova hranolu. Tohoto stavu se docílí naklápěním rovin polarizačního kontroléru. Vztah natočení rovin polarizačního kontroléru a polarizačního stavu popisuje Poincarého sféra na obr. 61.



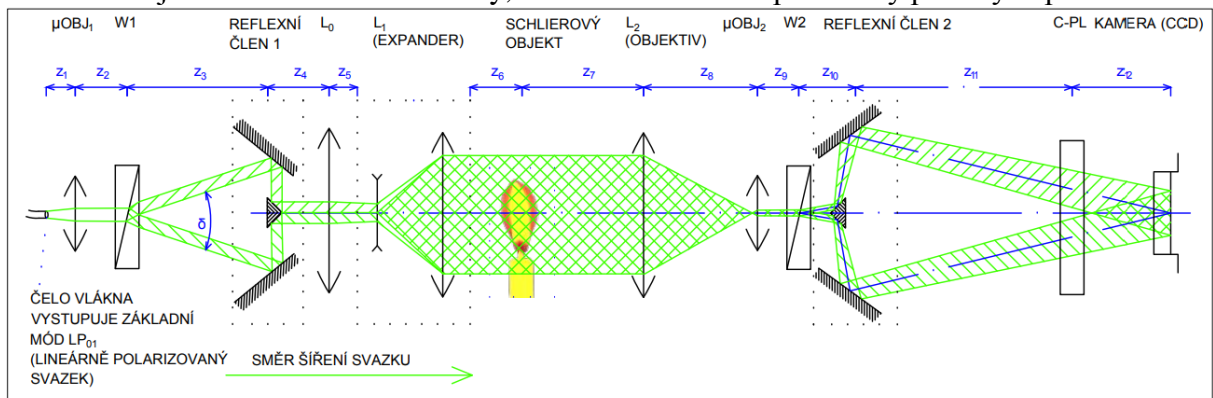
Obr. 61. - Poincarého sféra a její aplikace na při nastavení polarizačního stavu. Převzato z [100] - demonstrace vlivu naklopení lopatek na polarizační stav znázorněný Poincarého sférou. H - horizontální lineární polarizace, V - vertikální lineární polarizace, R - pravotočivá kruhová polarizace, L - levotočivá kruhová polarizace.

- Vlákenný vazební člen

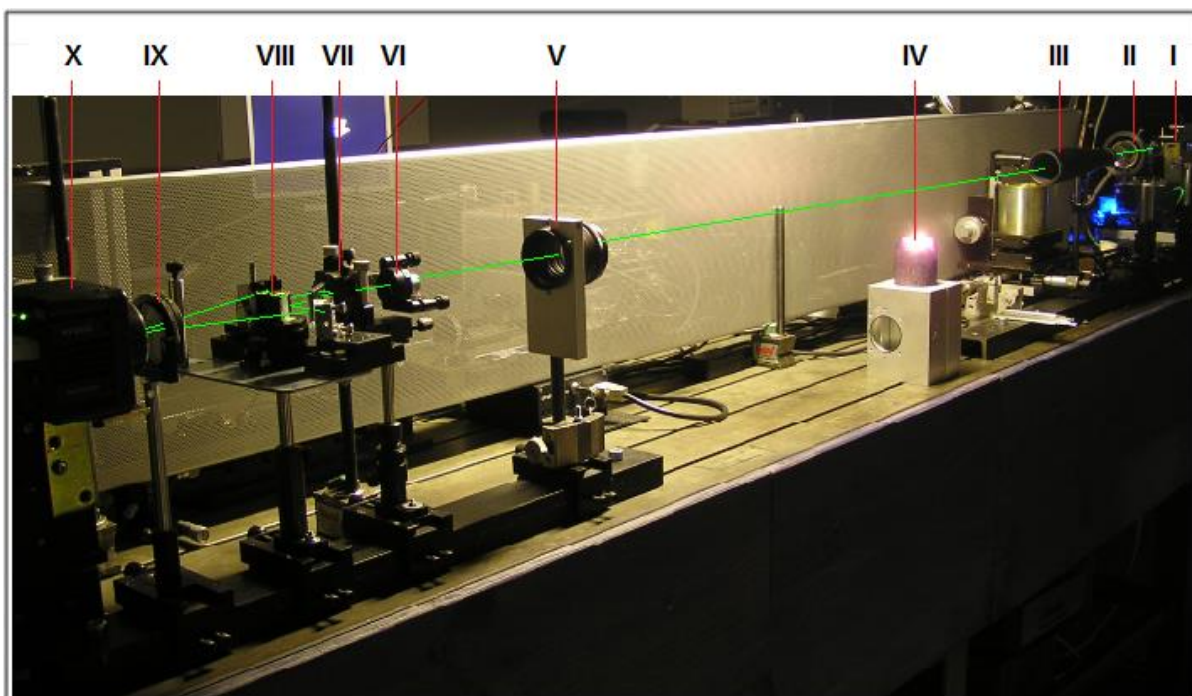
Byl použit vlákenný vazební člen 2×1 tak, aby výstupní svazek vytvořený kolimací LP módu KOLIMAČNÍM μ OBJ s definovanou rovinou polarizace osahoval energii obou vlnových délek (modrého i zeleného záření laseru).

7.2.2.2 Technická dokumentace - sestava pro schlierové zobrazování

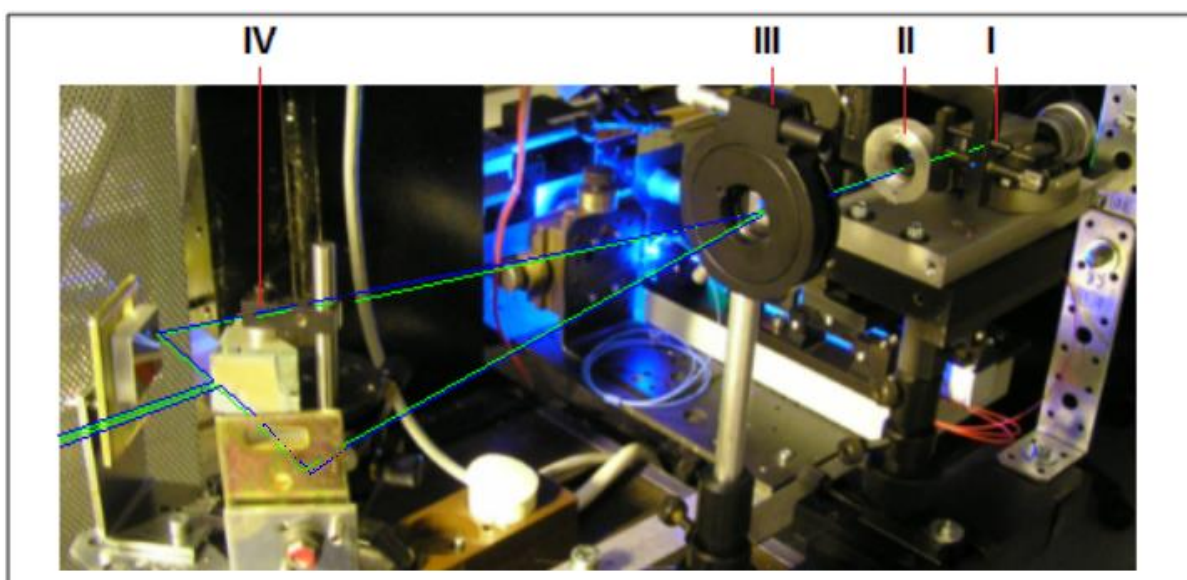
V této části je uvedeno schéma sestavy, fotodokumentace a parametry použitých prvků.



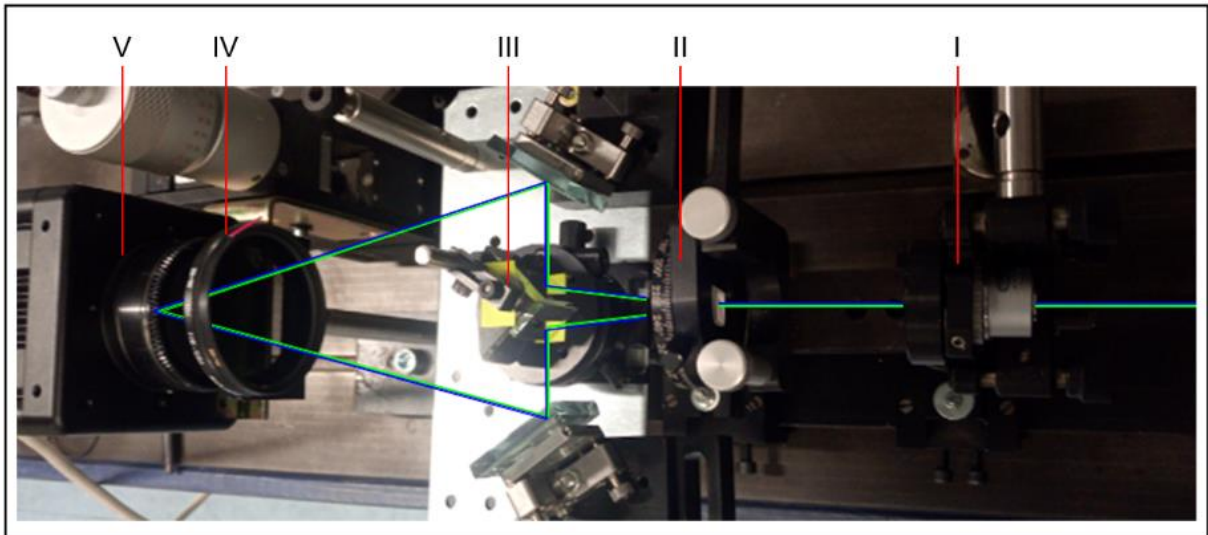
Obr. 62. - Schéma realizované sestavy s fázovým filtrem μ OBJ1, μ OBJ2 - kolimační (mikroskopové) objektivy; W1, W2 - Wollastonovy hranol; REFLEXNÍ ČLEN 1, REFLEXNÍ ČLEN 2 - sestava zrcadel upravující chod svazků [24]; L0 - korekční spojná čočka; L1 (EXPANDER) - Expander; L2 (OBJEKTIV) - objektiv; C-PL - kruhový polarizátor; KAMERA (CCD) - kamera. Rozměry sestavy v (mm): $z_1 = 7$; $z_2 = 70$; $z_3 = 150$; $z_4 = 200$; $z_5 = 170$; $z_6 = 600$; $z_7 = 600$; $z_8 = 270$; $z_9 = 40$; $z_{10} = 10$; $z_{11} = 160$; $z_{12} = 40$.



Obr. 63. - Celkový pohled na realizovanou sestavu s "fázovým břitem"
 Z důvodu přehlednosti je chod paprsků obou vlnových délek naznačen pouze zelenou barvou. Směr šíření paprsku je od I po X, přičemž I - REFLEXNÍ ČLEN 1 - sestava zrcadel upravující chod svazků; II - L0 - korekční spojná čočka; III - L1(EXPANDER) - expander; IV - schlierovský objekt; V - L2 (OBJEKTIV) - objektiv; VI - μ OBJ₂ - kolimační (mikroskopový) objektiv; VII - W2 - Wollastonův hranol; VIII - REFLEXNÍ ČLEN 2 - sestava zrcadel upravující chod svazků; IX - C-PL - kruhový polarizátor; X - KAMERA (CCD) - kamera. Pojmenování prvků koresponduje s obr. 58.



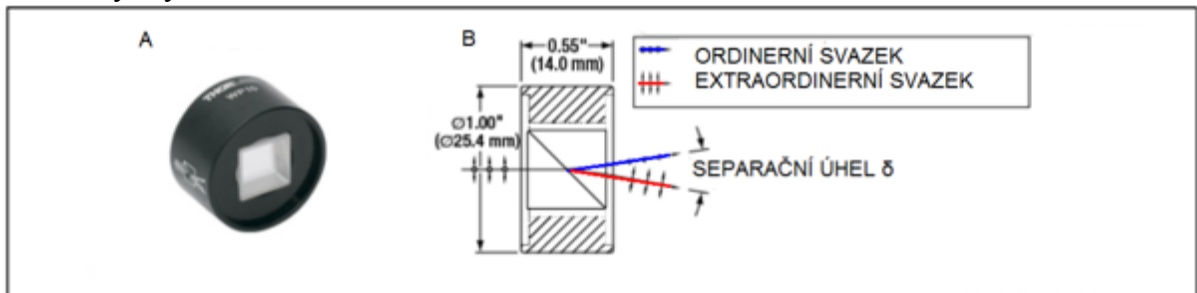
Obr. 64. - Detail prostoru kolimačního objektivu Wollastonova hranolu a reflexního členu. Svazky se šíří od I směrem k IV. I - čelo vlákna (vystupuje mód LP01); II - μ OBJ₁ - kolimační (mikroskopový) objektiv; III - W1 - Wollastonův hranol 1; IV - REFLEXNÍ ČLEN 1 - sestava zrcadel upravující chod svazků. Pojmenování prvků koresponduje s obr. 58.



Obr. 65. - Detail prostoru fázového filtru reflexního členu 2 a kamery. Svazky se šíří od I směrem k V. I - μOBJ_2 - kolimační (mikroskopové) objektivy; II - W2 - Wollastonův hranol; III - REFLEXNÍ ČLEN 2 - Sestava zrcadel upravující chod svazků; IV - C-PL - kruhový polarizátor; V - KAMERA (CCD) - kamera. Pojmenování prvků koresponduje s obr. 58.

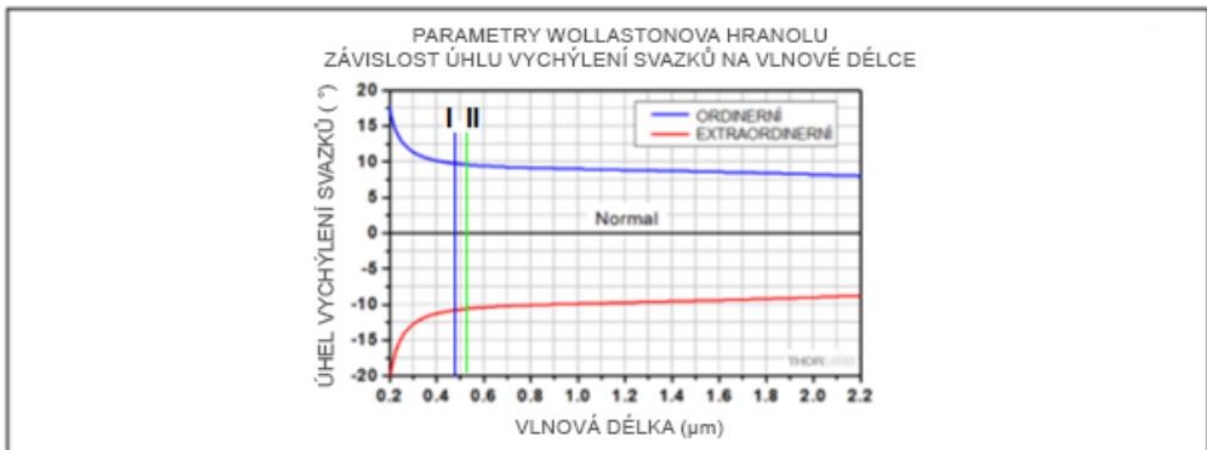
- μOBJ_1 - Kolimační objektiv (1)
Použit mikroskopový objektiv se zvětšením 12 \times .
- W1 - Wollastonův hranol (1)
Separační úhel 10 $^\circ$

Kalcitový krystal s abtreflexní vrstvou WP10-A: 350 nm - 700 nm.



Obr. 66. - Wollastonův hranol. A - fyzická podoba použitého přípravku s Wollastonovým hranolem; B - technické parametry a znázornění činnosti přípravku s Wollastonovým hranolem. Převzato z [105].

Úhel odchylení paprsku Wollastonovým hranolem na obr. 66. je závislý na vlnové délce, proto následuje vyznačení oblasti použitých vlnových délek.

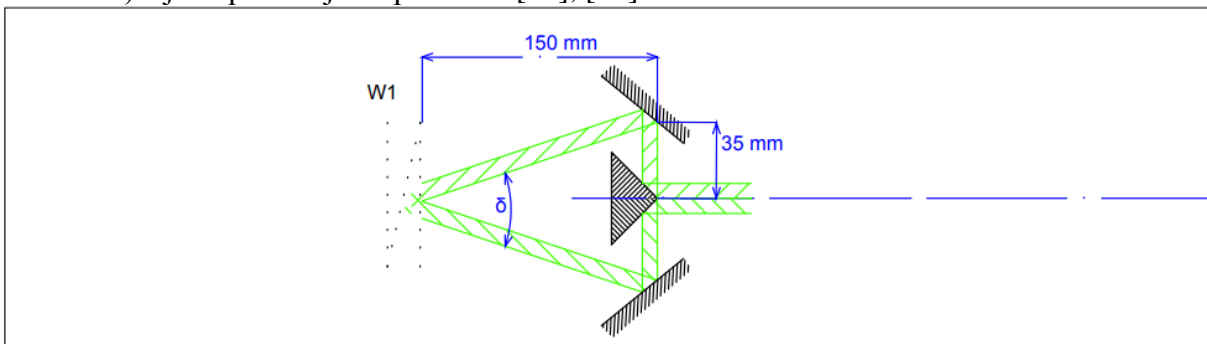


Obr. 67. - Wollastonův hranol - závislost úhlu odchýlení na vlnové délce.

Wollaston Prisms (Thorlabs), přibližně vyznačeny použité vlnové délky I - 473 nm, II - 532 nm. Převzato z [105].

- REFLEXNÍ ČLEN 1

Na obr. 67. je vyobrazen reflexní člen skládající se ze dvou zrcátek po stranách a středového hranolu se zrcátky, v němž zrcadla svírají úhel 90°. Je uložen 150 mm za W1 (Wollastonovým hranolem) a jeho použití je inspirováno [33], [81].

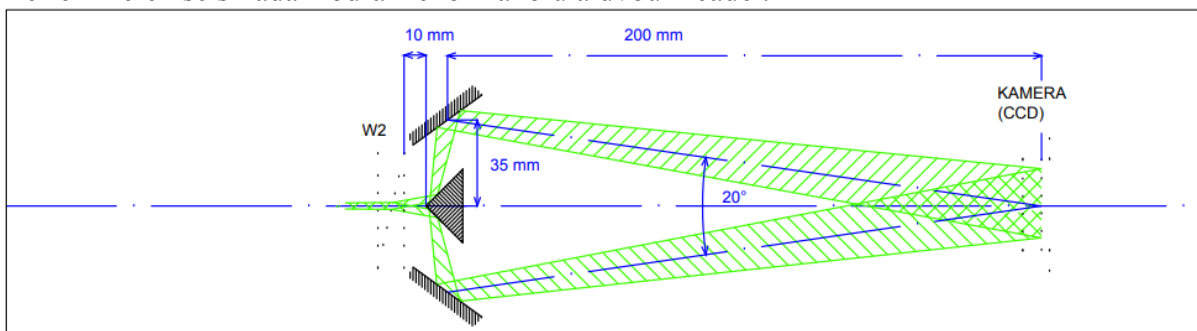


Obr. 68. - Schéma prvku reflexní člen 1.

- L₀ - korekční spojná čočka slouží ke korekci velmi malého úhlu mezi $\lambda = (473 \text{ nm})$ a $\lambda = (532 \text{ nm})$, který vzniká na Wollastonově hranolu W1 podle charakteristiky uvedené na obr. 67. Napomáhá také zavést svazky do expandéru.
- L₁ (EXPANDER)
Expander BE-20M Thorlabs
- L₂ (OBJEKTIV)
Použit objektiv s ohniskovou vzdáleností 200 mm.
- μOBJ_2 - Kolimační objektiv (2)
Použit mikroskopový objektiv se zvětšením 12 \times .
- W2 - Wollastonův hranol (2)
Je identický s W1(str. 62).

- REFLEXNÍ ČLEN 2

Reflexní člen se skládá z odrazného hranolu a dvou zrcadel.



Obr. 69. - Schéma prvku reflexní člen 2.

- C-PL Kruhový polarizátor

V sestavě byl použit kruhový polarizátor B+W C-POL.



Obr. 70. - Fotografie použitého polarizátoru C-PL.

- KAMERA (CCD)

Pro měření byla použita kamera HVDUO-10M Digital Color Camera se snímacím senzorem Foveon X3 CMOS Color Image Sensor.

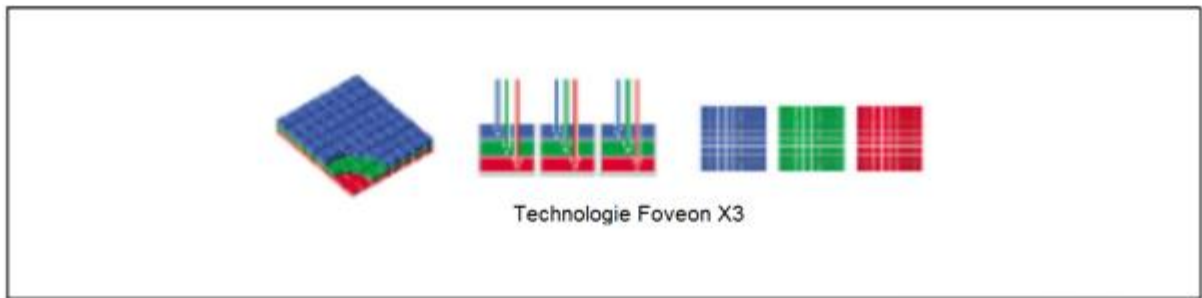


Obr. 71. - Fotografie použité kamery.

Parametry

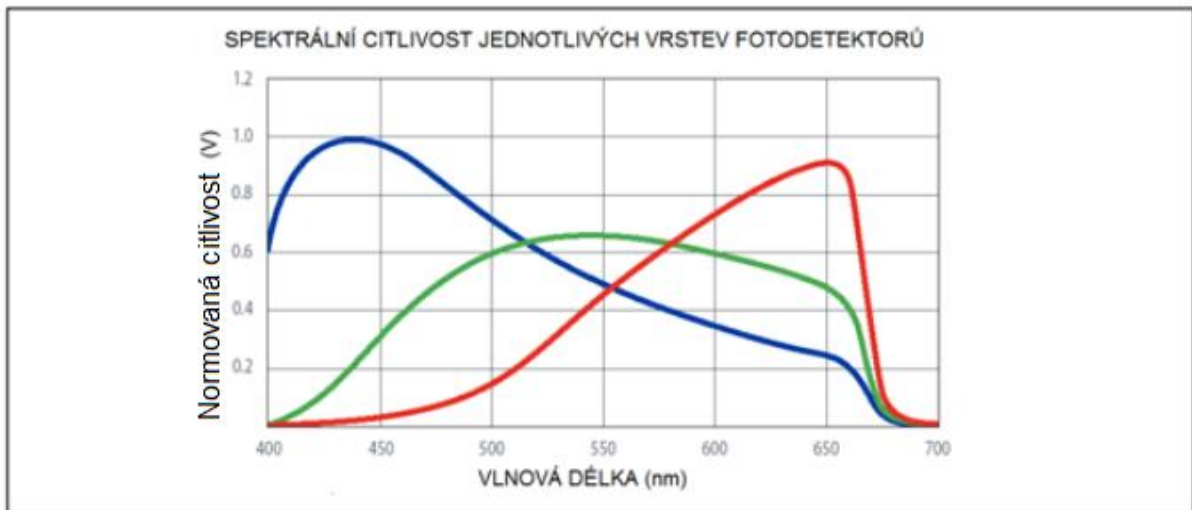
- 3×10,2 Mpx v matici 2268 × 1512 odpovídá barevnému výkonu 3 čipů
- Čtvercové pixely o velikosti 9,12 μm
- Maximální rychlost skenování 6,5 KHz
- Software pro ovládání kamery HanVision
- 30. bitový RGB výstup se snadno připojí k široké škále grabovacích karet.

Technologie Foveon X3 nevyužívá barevnou masku a neomezuje tak citlivost záznamu. Snímací senzory, využívající technologii Foveon X3, poskytující tři vrstvy fotodetektorů každému umístění pixelu tři, takže umístění každého pixelu detekuje plnou barvu. Nedochází proto ke světelným ztrátám vlivem barevné masky a místa detekce všech tří barev jsou shodná.



Obr. 72. - Princip technologie Foveon X3.
Převzato z [99].

Citlivost vrstev senzorů ve fotoaparátu HVDUO - 10M je dána absorpčními vlastnostmi křemíku.

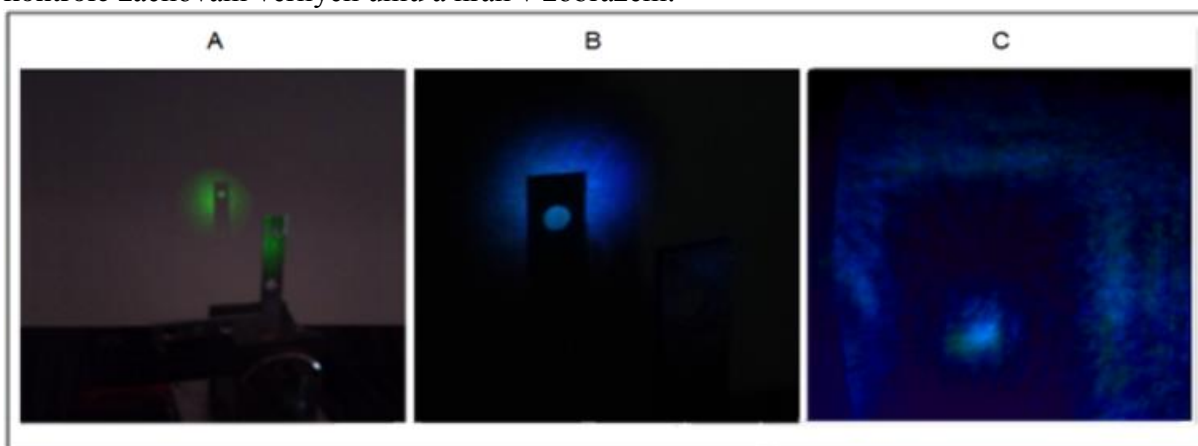


Obr. 73. - Normalizovaná spektrální citlivost červeného, modrého a zeleného senzoru.
Převzato z [99].

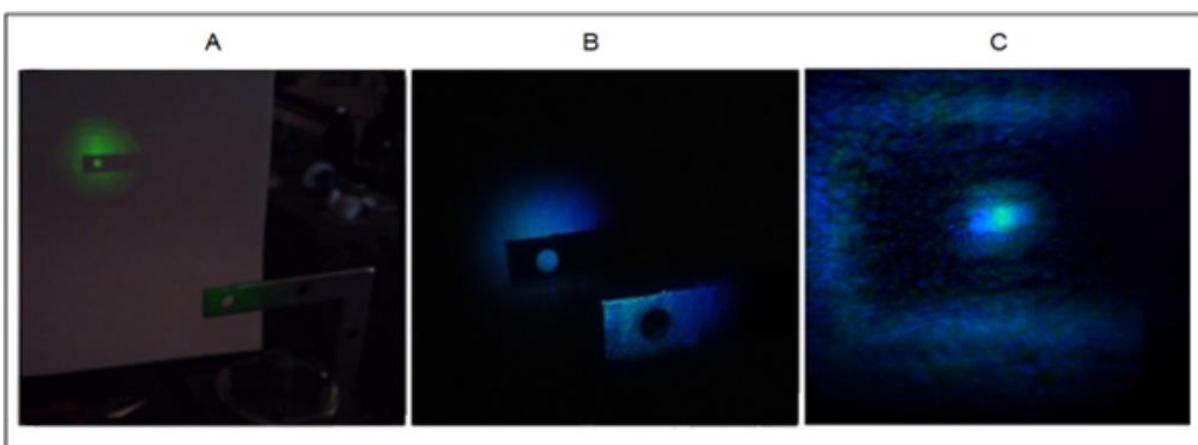
- Pro stanovení teploty byla používána termokamera Fluke TI 100.

7.2.3 Příklad justáže sestavy

Testovací objekt má šířku 1 cm, průměr otvoru 0,5 cm a slouží jednak k nastavení zřetelného výsledného zobrazení superpozice interferencí obou svazků, justáži správného překrytí a ke kontrole zachování věrných úhlů a hran v zobrazení.

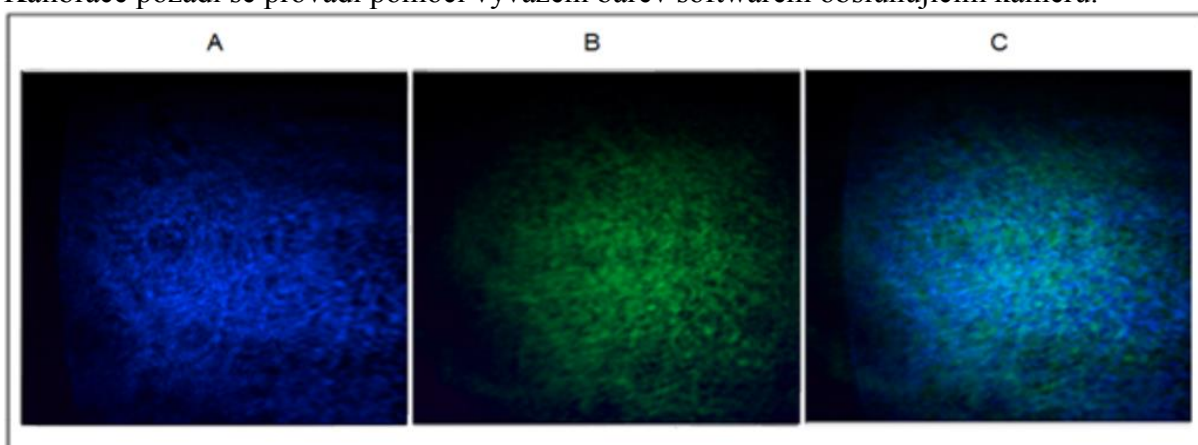


Obr. 74. - Příklad justáže pomocí referenčního prvku vertikálně.



Obr. 75. - Příklad justáže pomocí referenčního prvku horizontálně.

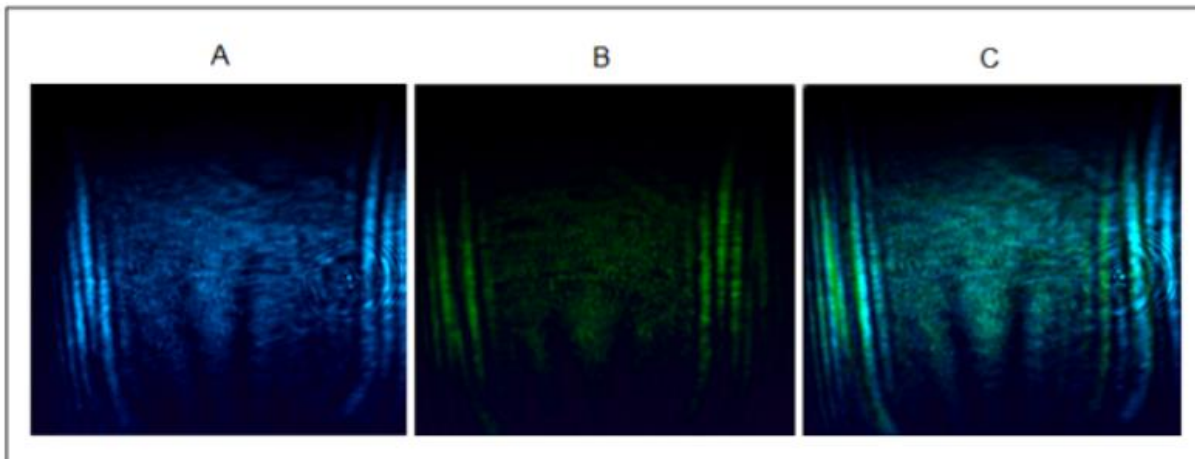
Kalibrace pozadí se provádí pomocí vyvážení barev softwarem obsluhujícím kameru.



Obr. 76. - Barevná kalibrace záznamu záření na pozadí.

7.2.4 Provedená měření

7.2.4.1 Využití vlnových délek 473 nm a 532 nm při měření

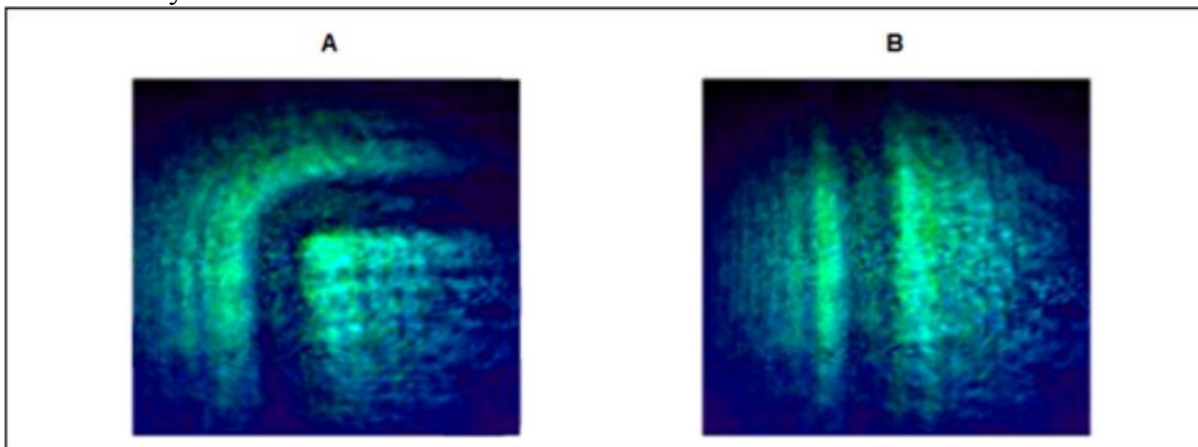


Obr. 77. - Porovnání záznamů měření pro jednotlivé vlnové délky a jejich kombinaci. Zobrazení projevů plamene - A - 473 nm, B - 532 nm, C - 473 & 532 nm současně

Pozorování oběma vlnovými délkami současně je významným benefitem. Pro každou vlnovou délku je výsledek pozorování odlišný. Současné měření oběma použitými vlnovými délkami umožňuje pozorování jednoho. Výsledky je možné vzájemně porovnávat, což je výhodné zejména při provádění měření kvantitativních. Použité vlnové délky se liší o 59 nm. Tento interval byl zvolen ve vztahu k použitým prvkům jako Wollastonův hranol, na kterém dochází jen k velmi malému odchýlení jednotlivých vlnových délek, jak je naznačeno v kapitole [7.2.2.2 obr. 67 na straně 63](#) a jejich volba zohledňovala poznatky uvedené v kapitole [7.2.1.5](#).

7.2.4.2 Pozorování schlierovou metodou zobrazení projevů difrakce na tenkém objektu v detekční oblasti

V detekční oblasti byly schlierovou metodou zobrazeny difrakční jevy na tenkém vlákně (obr. 78), aby mohly být posouzeny projevy a vlivy difrakce. Je patrné, že při použití objektů s hranami bude výsledek zatížen difrakcí na hraně objektu. Pozorování začne být problematické při použití objektů s menším rozměrem, než 1,2 mm, protože objekt se vlivem difrakcí stává méně zřetelným.

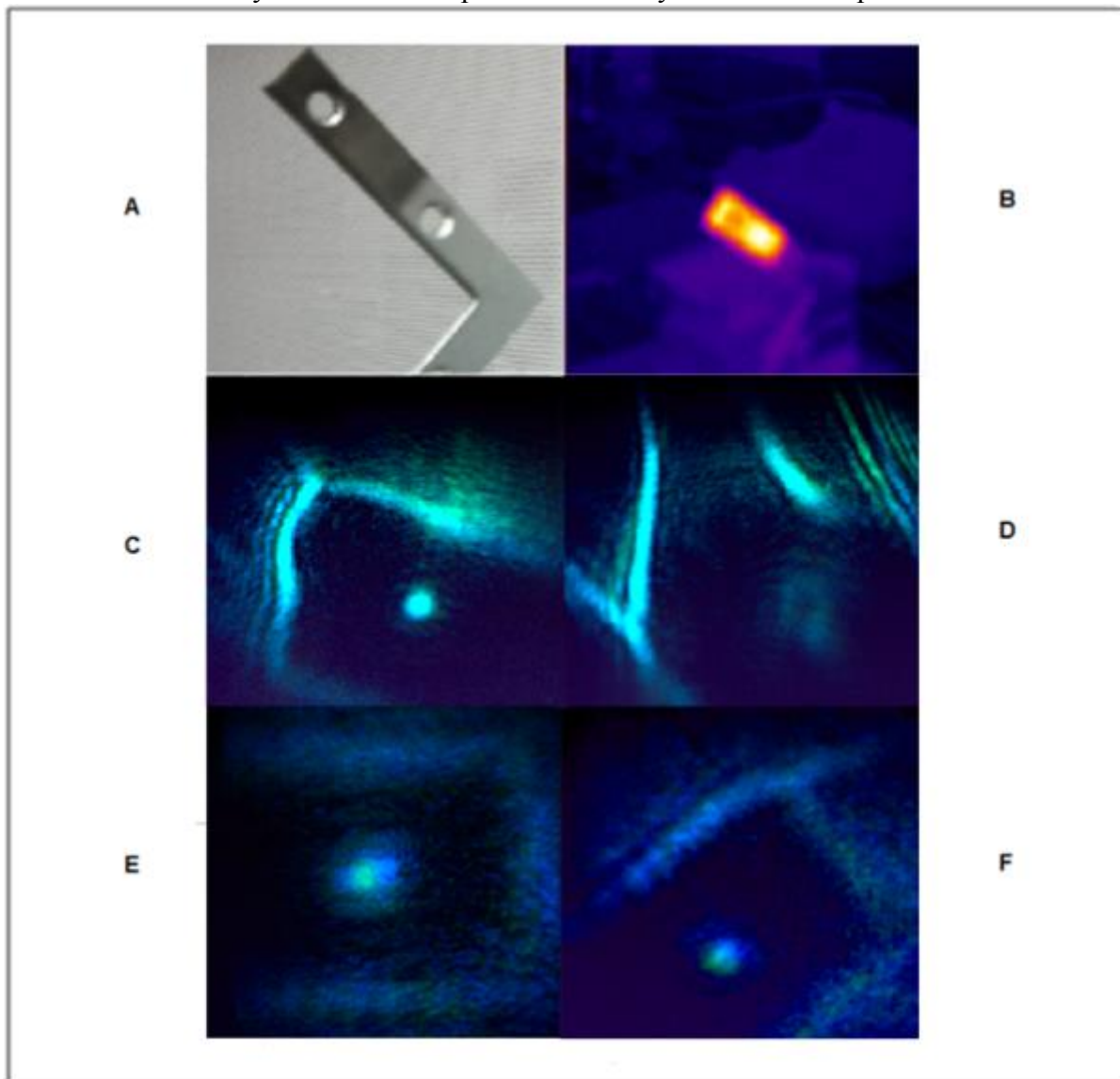


Obr. 78. - Zobrazení projevů difrakce.

Schlierovou metodou zobrazení s "fázovým břitem" zaznamenaný projev difrakcí na tenkém objektu. A - inbus s průměrem 1,9 mm, B - drát o průměru 1,2 mm.

7.2.4.3 Zobrazení projevů zahřátého tělesa v detekční oblasti

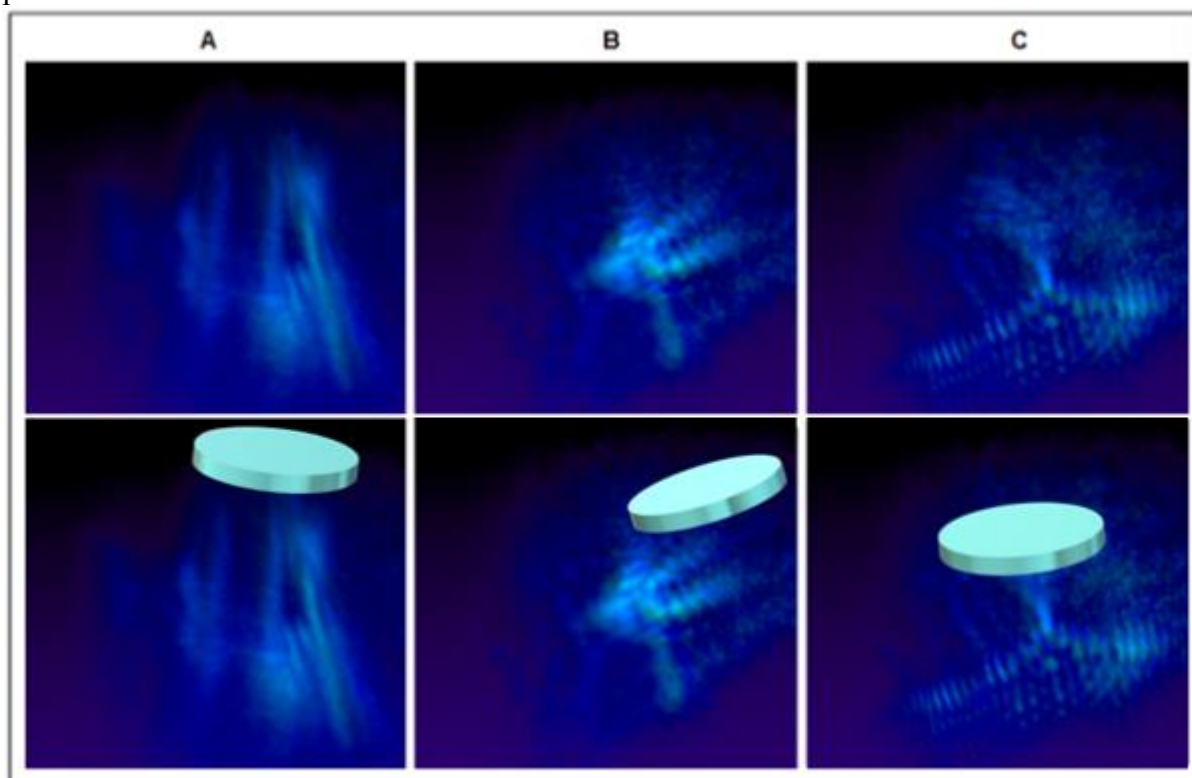
Záznam jevů na okrajích kovového tělesa, zahřátého na různé teploty, schlierovou metodou zobrazení s fázovým břítem. Teplota tělesa byla určována pomocí termokamery.



Obr. 79. - Zobrazení projevů zahřívání objektu se zanedbatelným rozměrem v ose z. A - Fotografie předmětu; B - fotografie termokamerou, teplota 230°C; C - zobrazení projevů horkého vzduchu kolem předmětu při teplotě přibližně 150°C; D - Zobrazení projevů horkého vzduchu kolem předmětu při teplotě přibližně 200°C; E - předmět při teplotě okolí (19,8°C); F - předmět při teplotě přibližně 83°C. Měření E, F a C, D byla provedena za stejných podmínek a při shodném nastavení kamery.

7.2.4.4 Záznam projevů vlivu chladného tělesa v detekční oblasti

Předmětem měření byl studený vzduch v okolí, přibližně půl centimetru velkého kruhového mosazného objektu. K vychlazení byl použit propan-butanový plyn do zapalovače, který byl opakovaně nalit na objekt. Měření začalo po úplném odpaření plynu. Objekt se vždy do jedné minuty zahřál zpět na teplotu okolí a projevy proudění chladného vzduchu nebyly dále pozorovatelné.

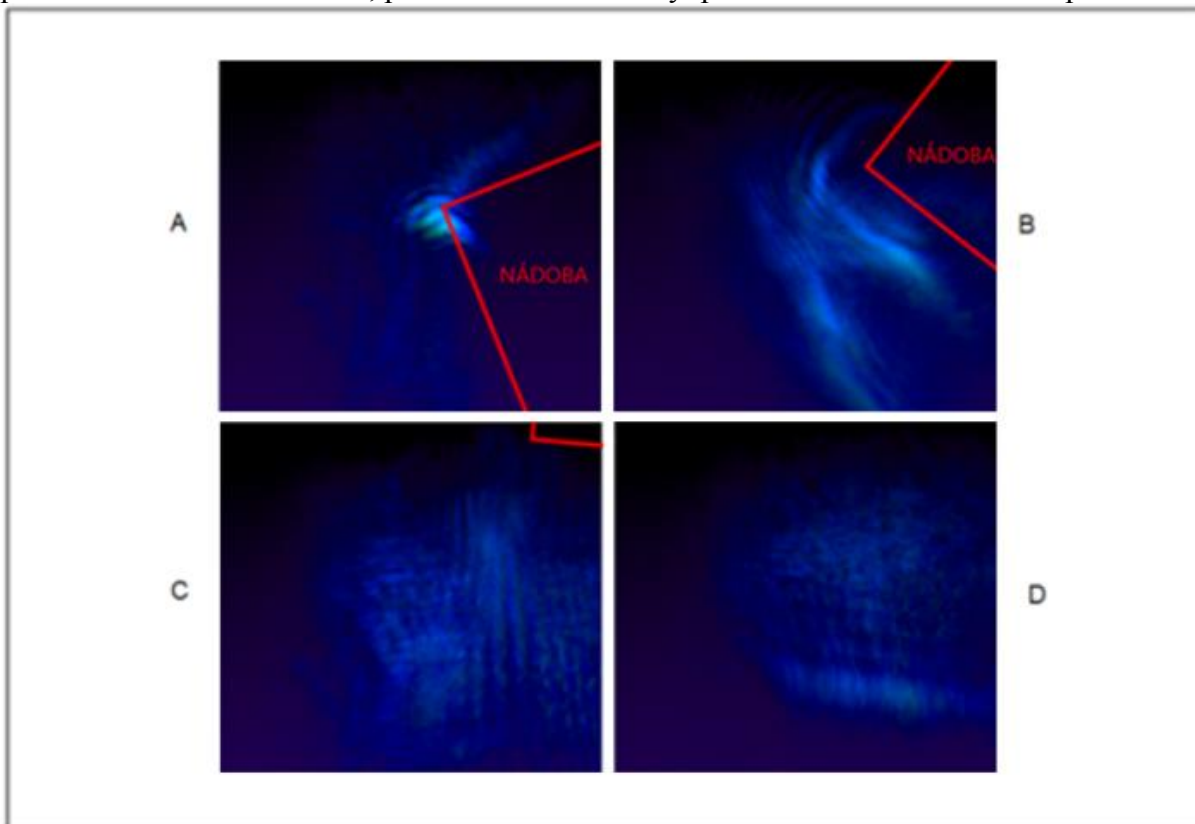


Obr. 80. - Zobrazení projevů v okolí chladného tělesa.

Schlierovou zobrazovací metodou zaznamenané proudění chladného vzduchu klesajícího z pevného předmětu, poloha mosazného objektu je přibližně naznačena domalovaným diskem. A - 10 s po začátku měření; B- 25 s po začátku měření; C - 45 s po začátku měření.

7.2.4.5 Záznam projevů vylévání propan-butanu ze skleničky a jeho mísení se vzduchem

Nádoba byla napuštěna plynným propan-butanem a přiklopena tak, aby plyn neunikal a jeho teplota se vyrovnala s okolní teplotou. Poté byla sklenice vložena do detekčního prostoru a bylo sňato víko. Pomalým a plynulým pohybem byla nádoba obrácena dnem vzhůru. Tento děj probíhal přibližně jednu minutu. Záznam na obr. 81. zachycuje jednotlivé fáze měření pořizované s intervalem 13 s, přičemž obr. 81. - A byl pořízen v čase 13 s od odklopení víka.

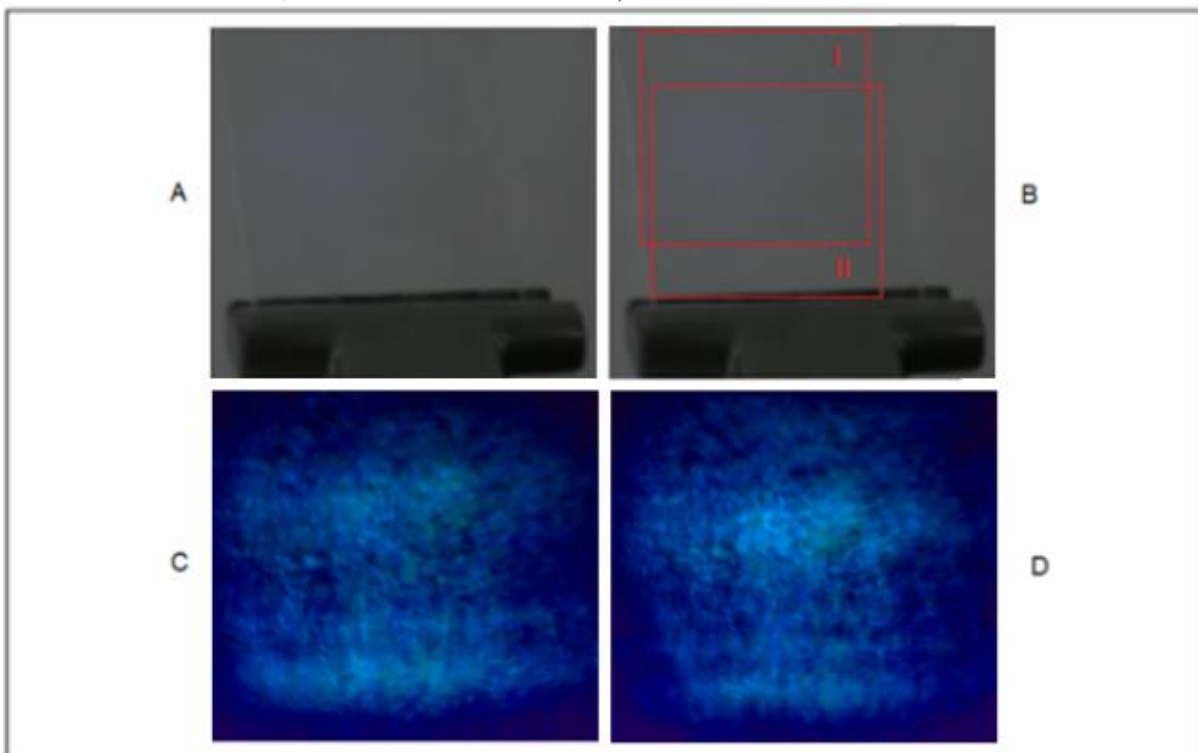


Obr. 81. - Zobrazení projevů mísení plynů.

Schlierovou zobrazovací metodou zaznamenaný propan-butan vyléváný z nádoby a jeho mísení se vzduchem. Červený rámeček naznačuje polohu nádoby. A - propan-butan se začal vylévat z nádoby; B - vyléváný propan-butan stéká po okraji nádoby; C - záznam měření vizualizuje tok propan-butanu, který probíhá vertikálně shora dolů; D - dochází k mísení propan-butanu se vzduchem, na vyobrazení je patrné, že se proužky zužují směrem k místu, kde byla nádoba a jsou horizontálně uloženy a patrně naznačují koncentraci propan-butanu ve vzduchu.

7.2.4.6 Záznam projevů působení tlaku kleštinami na plexisklo o síle 4 mm

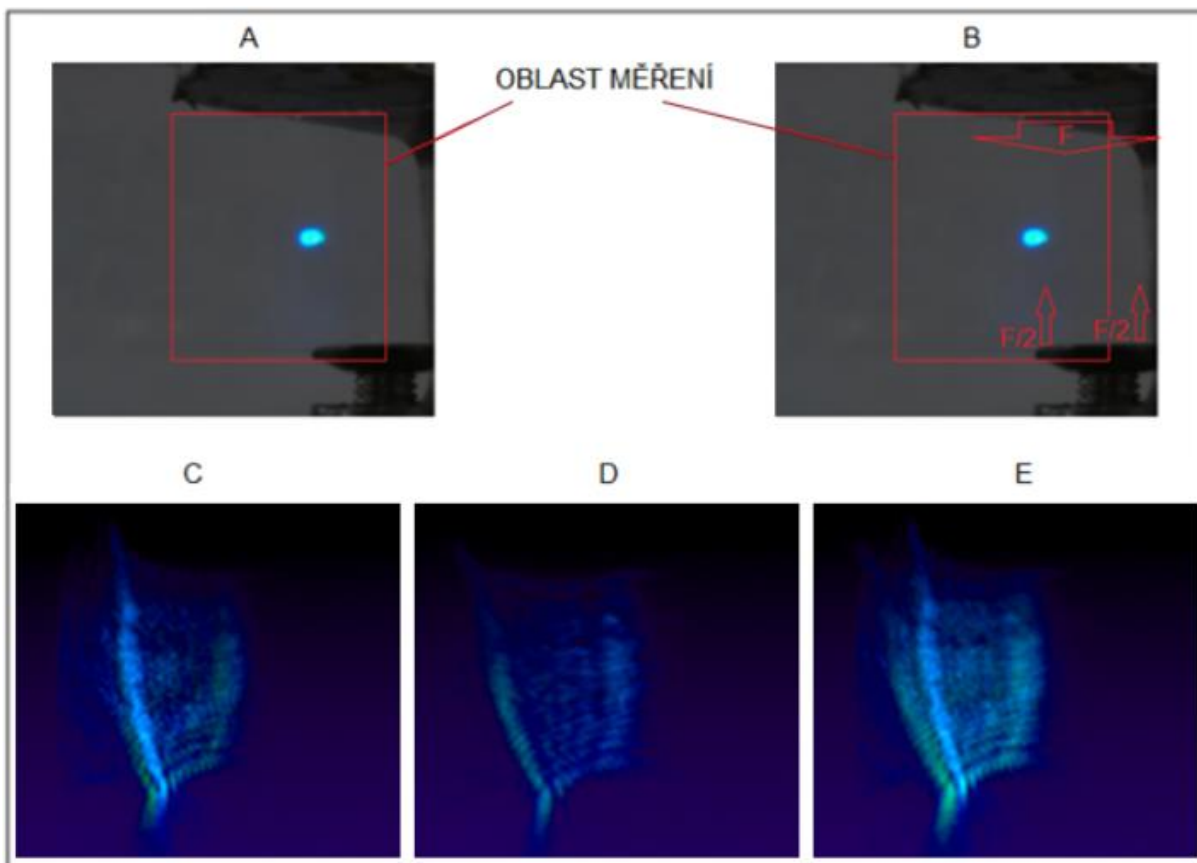
Plexisklo o tloušťce 4 mm a šířce 30 mm bylo uloženo nejmenším rozměrem, jak je vyobrazeno na obr. 82 - A, mezi hladké kleštiny o výšce 5 mm, přesahující šířku plexiskla. Kleštiny byly manuálně utaženy a objekt byl upevněn kolmo na směr šíření svazku. Měření zobrazuje projevy působení sil na objekt z plexiskla. Záznamy obr. 82 - C, D jsou opakovaným měřením tohoto procesu za shodných podmínek. Obr. 82 - B zobrazuje polohu detekčních oblastí (I - zobrazení obr. 82 - C; II - zobrazení obr. 82 - D).



Obr. 82. - Zobrazení projevů silového působení na průhledné těleso 1. Schlierovou metodou zobrazení zaznamenané projevy při působení síly na plexisklo.

7.2.4.7 Záznam projevů stlačování pruhu plexiskla o šířce 3 cm kruhovou svěrací patkou o průměru 1 cm

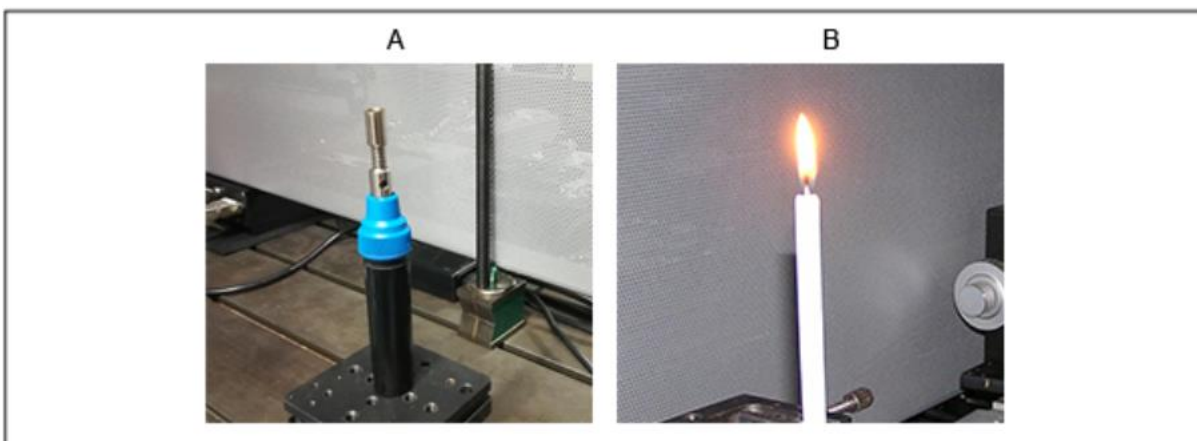
Plexisklo o tloušťce 4 mm a šířce 30 mm bylo uloženo na šířku mezi ostrý kruhový upínací šroub o průměru 15 mm a tloušťce 1 mm proti kovové desce, jak je zobrazeno na obr. 82 - A. Tlaková síla působila na plexisklo ve dvou bodech na jedné straně a na druhé straně je síla rozložena po ploše 20 mm × 4 mm. Šroub byl utažen a objekt byl upevněn kolmo na směr šíření svazku. Měření zobrazuje projevy deformačních sil působících na objekt z plexiskla.



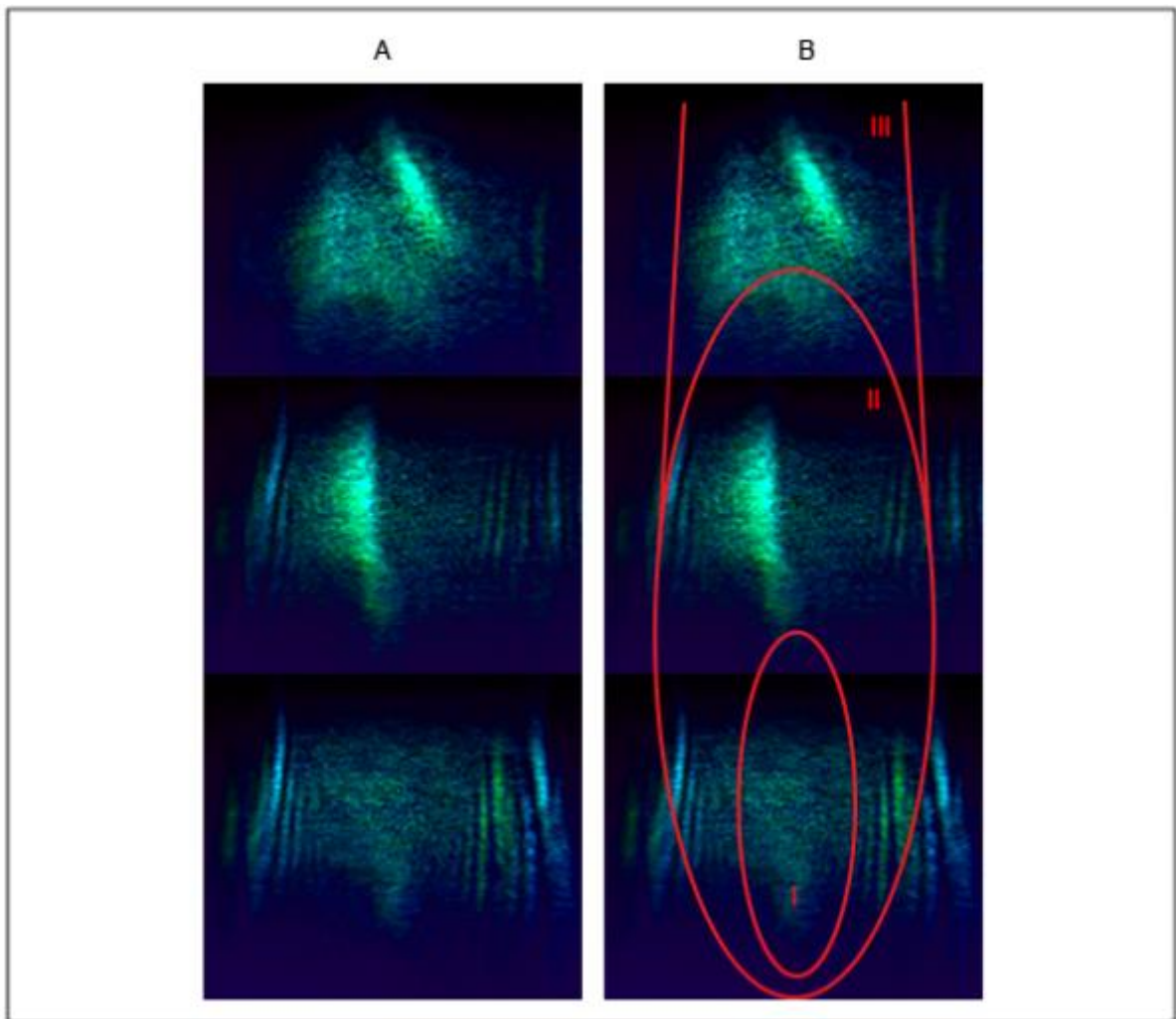
Obr. 83. - Zobrazení projevů silového působení na průhledné těleso 2. Schlierovou metodou zobrazení zaznamenané projevy napětí v plexiskle 2, A - situace při experimentu, B - Vyznačení působících sil C - ordinerní svazek, D - extraordinerní svazek, D - výsledná interference.

Výhodou zvolené konstrukce sestavy je možnost pozorování v kolmých polarizačních rovinách (v ordinerním, nebo extraordinerním svazku) také odděleně. Při tomto experimentu byly ordinerní a extraordinerní svazky ovlivnily výrazně odlišně. Možným vysvětlením je šíření v dvojlomém prostředí viz kapitola 6.5.1 rovnice (48), (49) strana 26, nebo stáčení polarizace při namáhání materiálu plexiskla.

7.2.4.8 Záznam projevů hoření plamene “hořáku” a svíčky v detekční oblasti

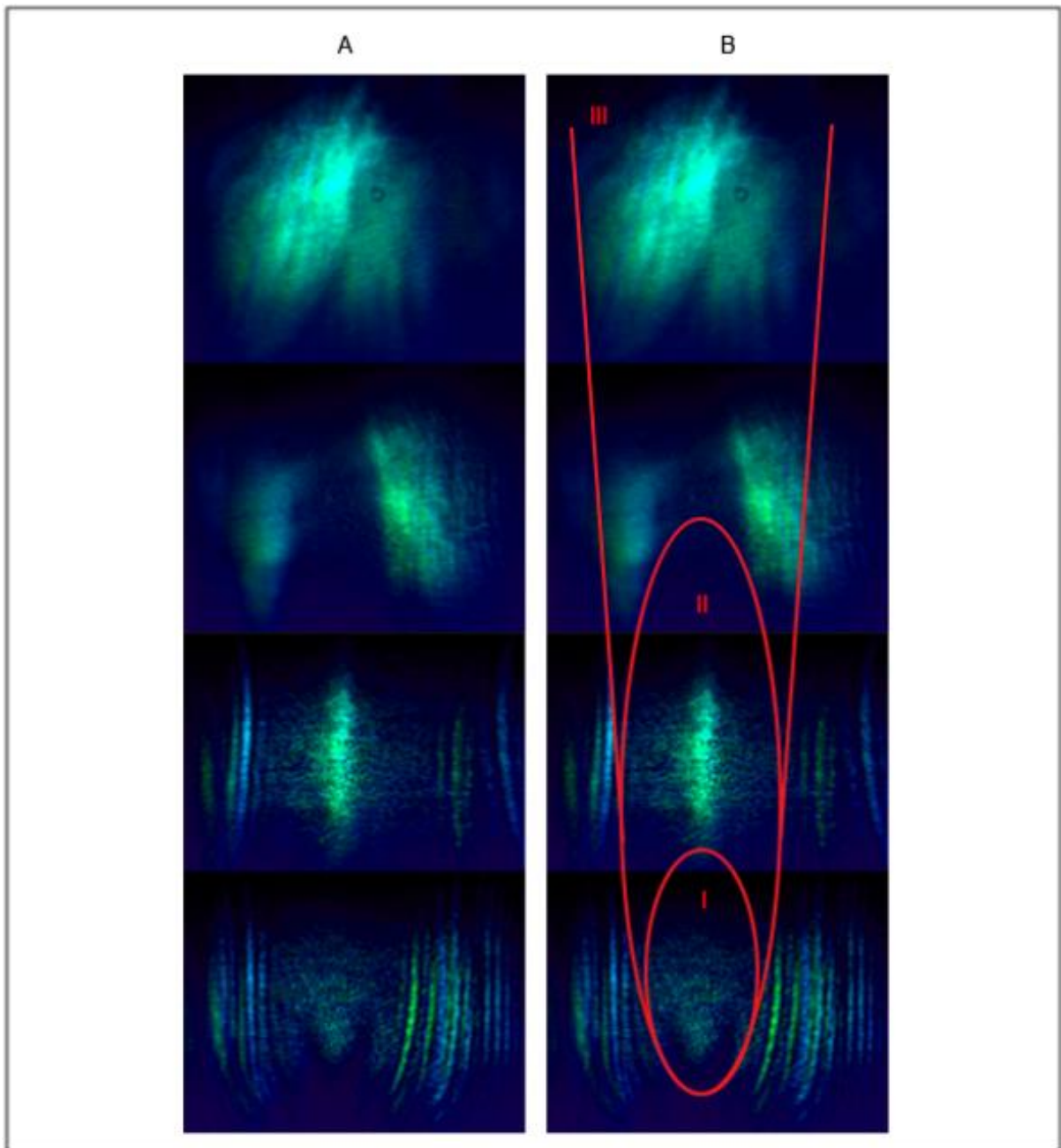


Obr. 84. - Použité zdroje plamene A - hořák; B - svíčka.



Obr. 85. - Zobrazení projevů plamene - svíčka.

Na obr. 85. jsou schlierovou zobrazovací metodou zaznamenané projevy plamene svíčky vertikálně. Hořící svíčka byla umístěna do detekční oblasti a byly pořízeny záznamy v různé výšce nad plamenem. Jedno měření má celkovou výšku 20 mm a po měření byly výsledky spojeny do celkového zobrazení. Na obr. 85. - B jsou přibližně vyznačeny významné oblasti - I - oblast s knotem, na horním okraji této oblasti je prostor s nejvyšší teplotou; II oblast horkého vzduchu nad “špičkou oblasti hoření plamene” vzduch zde proudí laminárním prouděním; III - v této oblasti přechází laminární proudění do turbulentního.

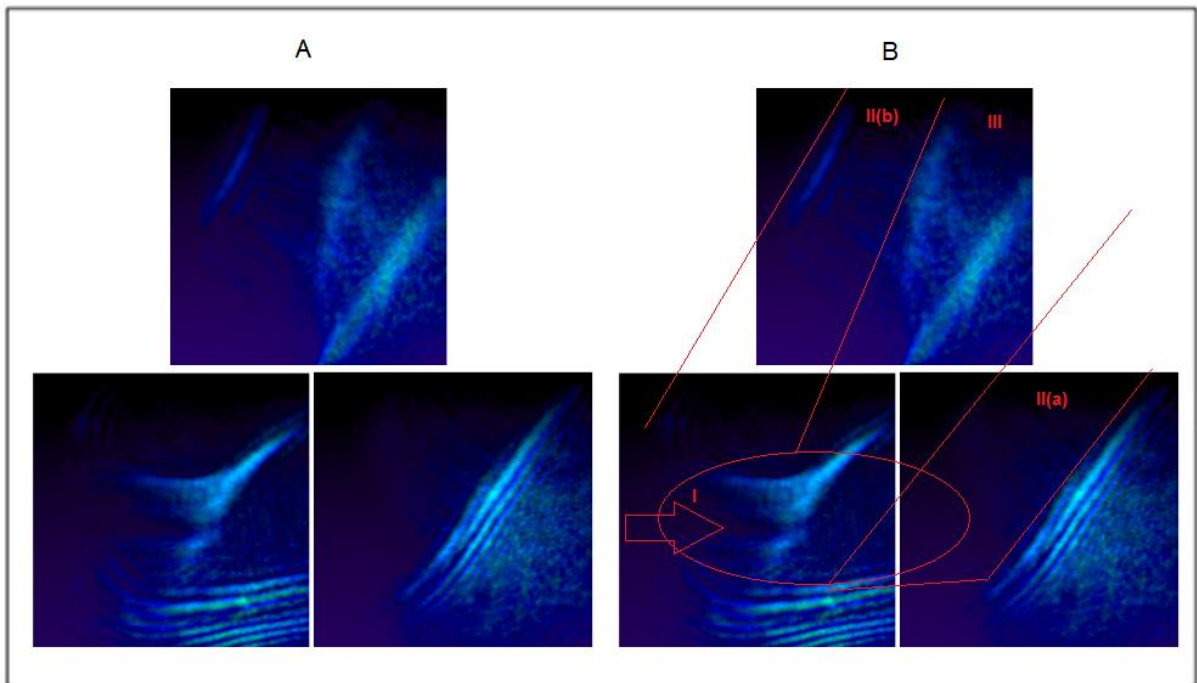


Obr. 86. - Zobrazení projevů plamene - „hořák“ vertikálně.

Obr. 86 vyobrazuje schlierovou zobrazovací metodou zaznamenané projevy plamene hořáku směřovaného vertikálně. Hořák byl umístěn do detekční oblasti a byly pořízeny záznamy v různé výšce nad plamenem. Jedno měření má celkovou výšku 20 mm a po měření byly výsledky spojeny do celkového zobrazení. Na obr. 86 - B jsou přibližně vyznačeny významné oblasti I - oblast s redukčním plamenem, na horním okraji této oblasti je prostor s nejvyšší teplotou, v dolním okraji je patrné vnikání propan-butanu se vzduchem do prostoru chemické reakce, II oblast horkého vzduchu nad “špičkou oblasti hoření plamene” vzduch zde proudí laminárním prouděním a má vysokou teplotu, jeho rychlost proudění je podstatně vyšší než u svíčky, což bylo určeno pozorováním. III - v této oblasti postupně přechází laminární proudění do turbulentního, hořák má přechod do turbulentního proudění výše nad plamenem a jeho tvar plamene a jeho okolí méně podléhá okolním turbulencím.



Obr. 87. - Fotografie plamene hořáku směřovaného horizontálně.



Obr. 88. - Zobrazení projevů plamene - „hořák“ horizontálně.

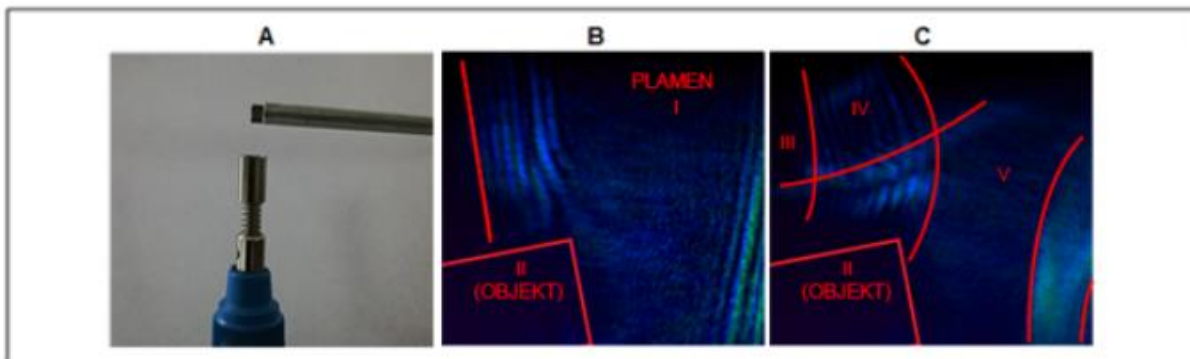
Schlierovou metodou zobrazení zaznamenaný projev plamene hořáku směřovaného horizontálně. A - záznam z měření; B - rozbor jednotlivých oblastí: I - oblast hoření plamene, směr šipky naznačuje tok propan-butanu, který hoří plamenem v oblasti I, II(a), II(b) oblast vzduchu zahřátého plamenem, III tok splodin reakce a oblast s nejvyšší teplotou.

Na obr. 88 byl hořák upevněn horizontálně a jeho posunem v detekční oblasti byly projevy hoření zaznamenány schlierovou metodou v různých místech okolí plamene.

Vzduch nad plamenem je mnohonásobně teplejší než pod plamenem proto gradient indexu lomu mezi oblastí II(a) a okolním vzduchem je mnohonásobně větší, než gradient indexu lomu mezi oblastí II(b) a okolním vzduchem, což se projeví nahuštěním úzkých proužků na okrajích oblasti II(a), kde se nachází poměrně ostré rozhraní mezi vzduchem horkým a chladným, což v okolí oblasti II(b) nepozorujeme.

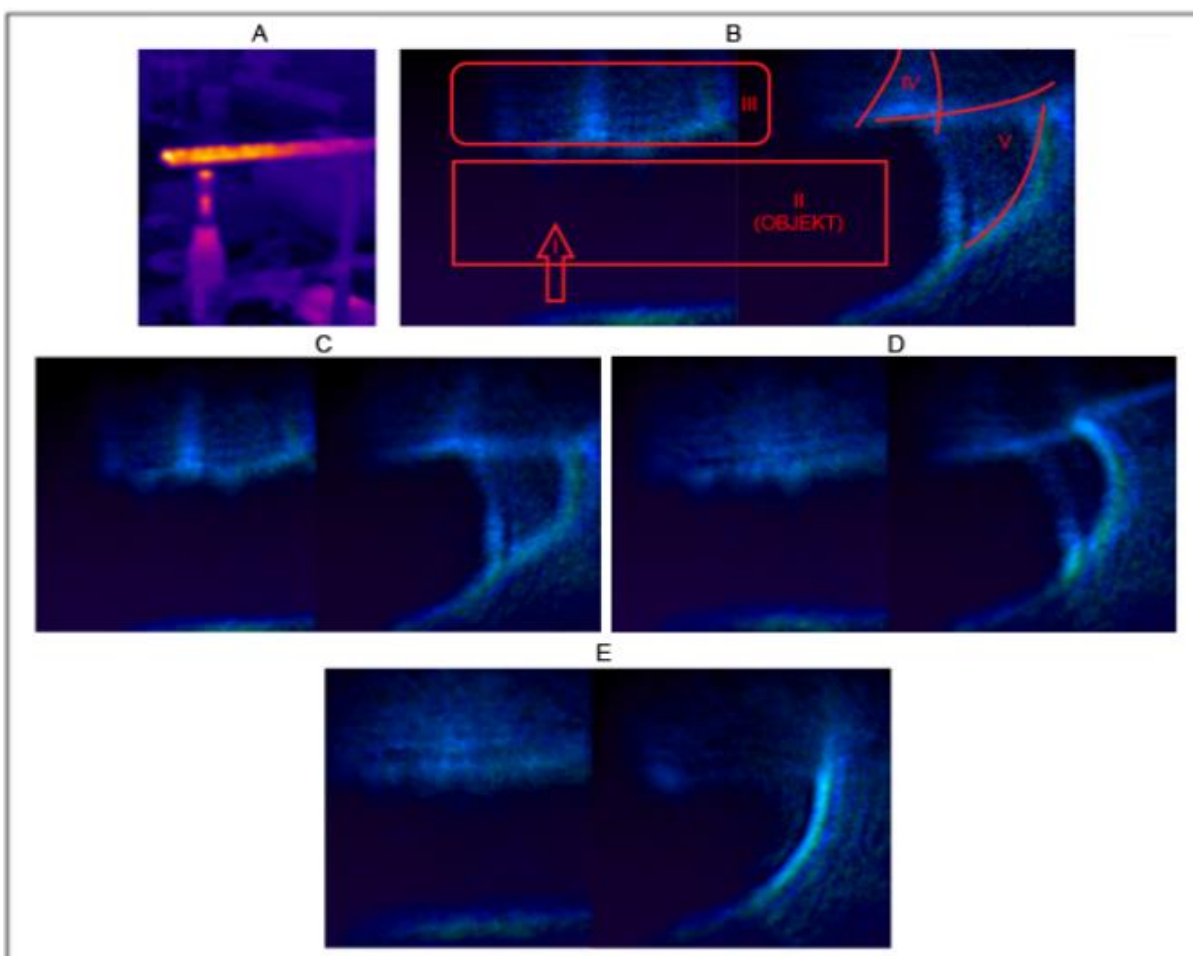
7.2.4.9 Záznam projevů přenosu tepla mezi plamenem, kovovým objektem a okolním vzduchem

Zahřátí a chladnutí kovového objektu nejprve na kraji, v detailu obr.89, poté blíže středu obr.90.



Obr. 89. - Zaznamenaná situace zahřátí okraje kovového objektu.

A - fotografie situace při experimentu B - zahřívání objektu plamenem C - zviditelnění dějů v okolí zahřátého objektu; I - plamen (zdroj tepla); II - kovový objekt; III - teplý vzduch nad objektem; IV - rozhraní teplého vzduchu nad objektem a okolí, V - prostor proudění teplého vzduchu ze spodního okraje objektu.



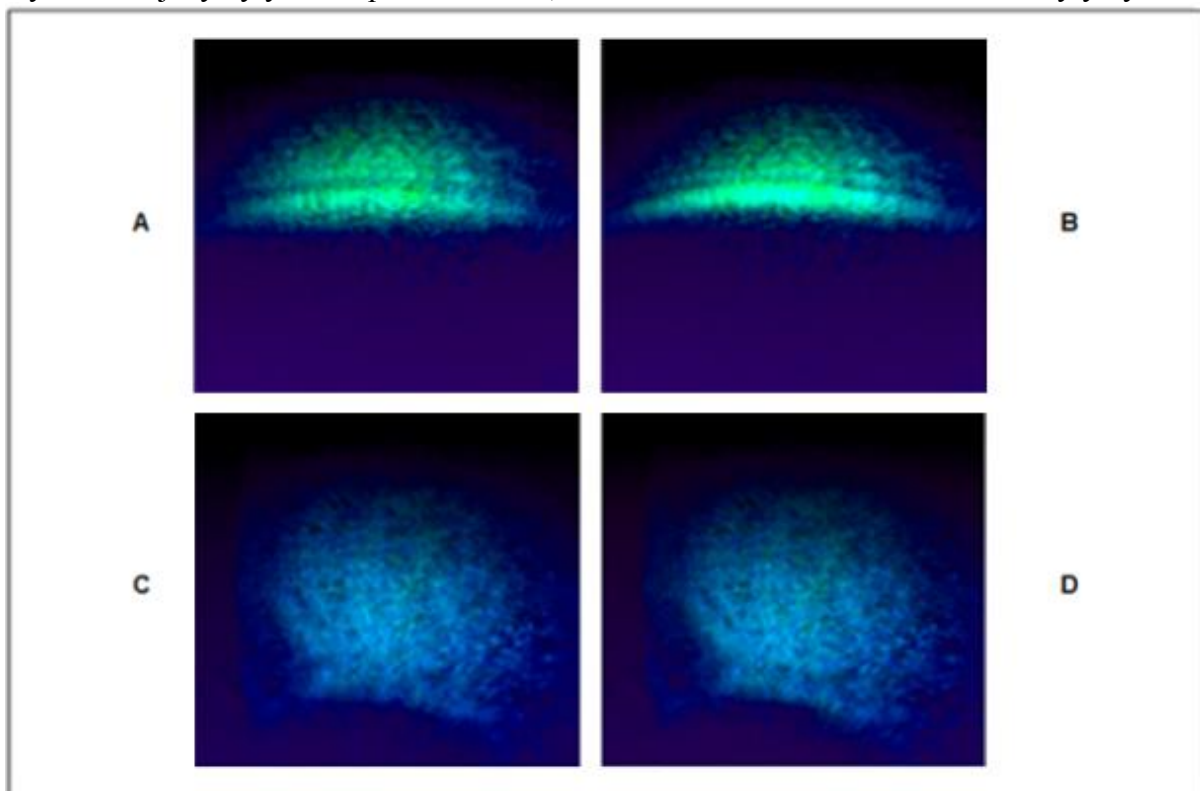
Obr. 90. - Záznamenaný vývoj situace po zahřátí kovového objektu 4 cm od okraje.

A - fotografie situace při experimentu termokamerou; B - I - plamen (zdroj tepla); II - kovový objekt; III - teplý vzduch nad objektem; IV - rozhraní teplého vzduchu nad objektem a okolí, V - prostor proudění teplého vzduchu ze spodního okraje objektu; C - záznam ihned po zhasnutí plamene (0 s); D - záznam experimentu (60s); E - záznam experimentu (120s).

Na obr. 90. jsou schlierovou zobrazovací metodou zaznamenané projevy přenosu tepla z kovového objektu do okolního vzduchu, zachycené ve třech po sobě následujících měřeních. Nejprve byl kovový profil (II - obr. 90) zahříván 30 vteřin hořákem na teplotu přibližně 260°C v místě (I - obr. 90). Poté byl hořák odstraněn a bylo provedeno první měření obr. 90 - C. V oblasti III je patrný silný proud horkého vzduchu směřující po spodní straně profilu k okraji. Horké proudy stoupají také z celého povrchu zahřáté části, protože nedošlo k distribuci tepla do celého objemu tělesa, ani odvedení dostatečného množství tepla do okolního vzduchu a lokální teplota je vysoká. Je dobře patrná i změna indexu lomu mezi vzduchem nad zahřátou částí a pod zahřátou částí. Měření bylo opakováno po 60. vteřinách obr. 90 - D. Vlivem odvedení tepla ze zahřátých oblastí poklesla maximální povrchová teplota v detekční oblasti, stále je však výrazný rozdíl teploty nad objektem a pod objektem. Po dalších 60. vteřinách bylo provedeno další měření, obr. 90 - E, výrazné proudění nad objektem ustalo, vyrovnala se teplota prakticky v celém objektu a značné množství tepla již bylo odvedeno do okolního prostředí, proudění vzduchu je pozvolné a nepozorujeme žádnou interferenční strukturu naznačující gradient indexu lomu mezi oblastmi v okolí objektu.

7.2.4.10 Záznam projevů tepelného proudění v okolí žárovky a plasmové koule

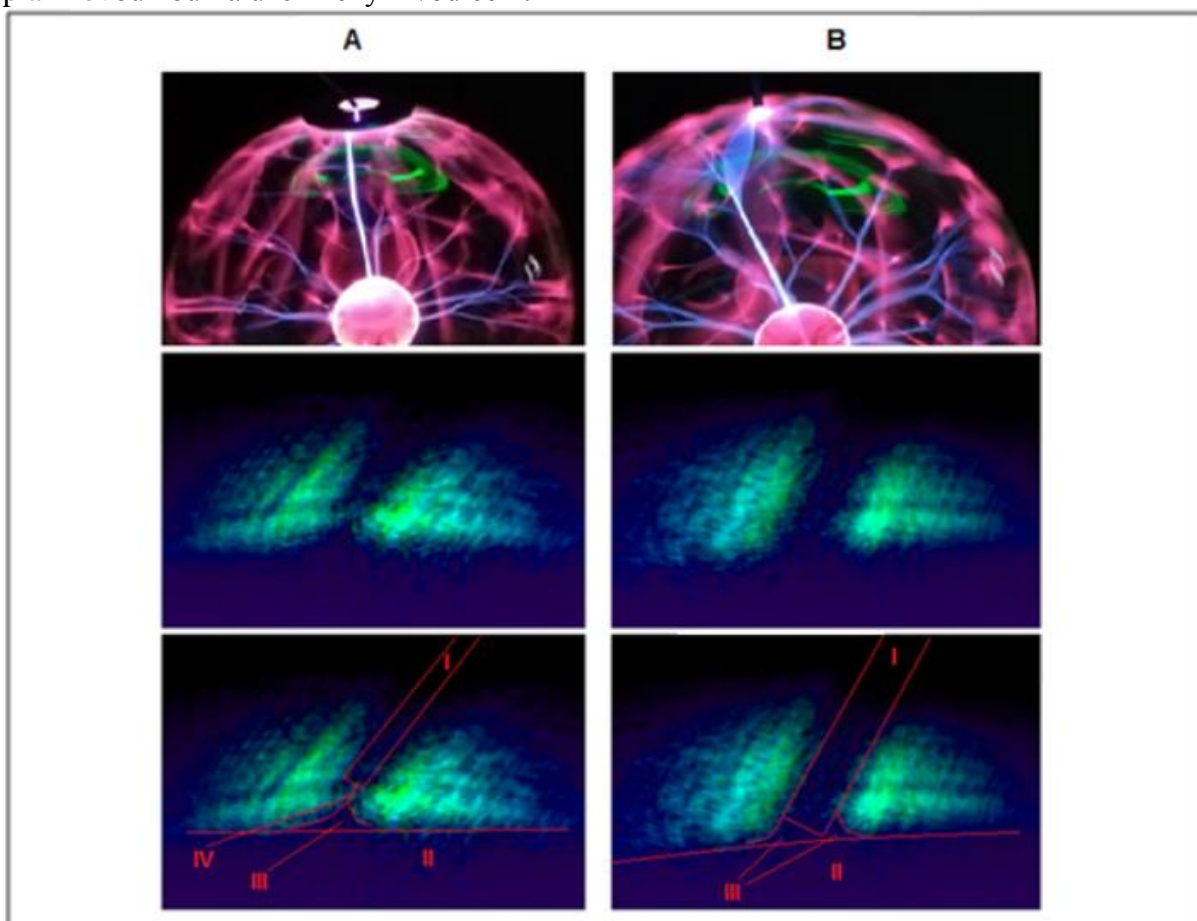
Dynamické jevy byly dobře pozorovatelné, interference na hranách schlier ale nebyly výrazné.



Obr. 91. - Zobrazení projevů v okolí žárovky a plasmové koule.

Schlierovou metodou zobrazení zaznamenaný projev proudění vzduchu kolem A - plasmové koule za teploty okolí, B - plasmové koule po zahřátí C - žárovky (10W) za teploty okolí, D - žárovky (10 W) po dvou minutách svícení.

Během experimentu s plazmovou koulí došlo k záznamu vlivu probíhajícího výboje mezi plazmovou koulí a uzemněným vodičem.



Obr. 92. - Záznam vlivu výboje.

Schlierovou metodou zobrazení zaznamenaný projev pozorovaný při výboji z plazmové koule. A - I - uzemněný vodič měděný drát 1,2mm, B - I - inbus 1,9mm, A - II - kovová destička na plazmové kouli, B - II - plazmová koule, A,B - III,IV - oblast projevu vlivu probíhajícího výboje mezi plazmovou koulí a uzemněným vodičem.

7.2.5 Dílčí závěr - vyhodnocení měření na sestavě s fázovým břítem

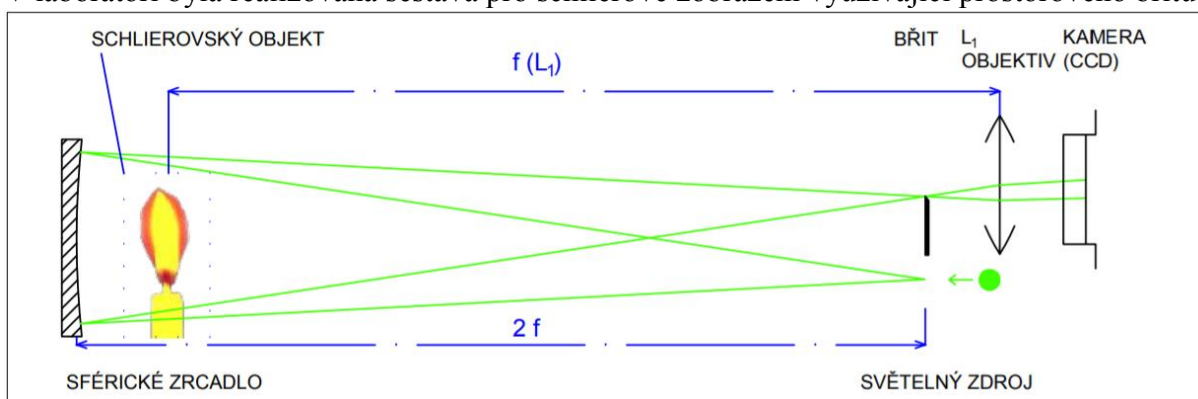
Výsledkem práce byla realizace sestavy pro schlierové zobrazování, využívající principu Toeplerovy sestavy se dvěma objektivy. Jako filtr schlierového zobrazení byl použit fázový filtr využívající Wollastonova hranolu. Byla zvolena varianta s polarizovanými, homogenními kolineárními svazky v detekční oblasti. Pro snížení zkreslení zobrazovaných polí byla použita soustava zrcadel měnící směr šíření svazků. Jako světelné zdroje byly použity lasery o vlnové délce 473 nm a 532 nm. Byla ověřena funkce sestavy pro kvalitativní měření schlierovou metodou zobrazení. Úspěšně byla provedena řada experimentů, zejména z oblasti termodynamiky. Vytvořená sestava je vhodná zejména pro studium vlivů schlierovských objektů s malými rozměry. Je možné dále rozvíjet potenciál sestavy v oblasti kvantitativního měření.

7.3 Realizace měření jednozrcadlovou sestavou s prostorovým břitem

V souladu s poznatky v kapitole 7.1 byla zvolena sestava využívající sférického zrcadla a prostorového břitu. V kapitole 7.3.1 *Specifika praktického provedení sestavy* bude proveden teoretický rozbor pro zvolenou sestavu. Bude naznačen výpočet citlivosti a popsány podmínky pro laboratorní realizaci i pro užití v procesu výuky. V kapitole praktický postup činnosti bude podrobně rozpracována technická dokumentace sestavy. Příklad justáže demonstruje základní postup nastavení sestavy před každým měřením a v kapitole provedená měření jsou záznamy vybraných provedených měření. Tato podkapitola je zakončena dílčím závěrem s podrobným vyhodnocením měření s využitím jednozrcadlové „of axis“ sestavy s prostorovým břitem.

7.3.1 Specifika praktického provedení sestavy

V laboratoři byla realizována sestava pro schlierové zobrazení využívající prostorového břitu.



Obr. 93. - Schématické zobrazení schlierové sestavy "of axis" s prostorovým břitem
SVĚTELNÝ ZDROJ - čelo přípravku s optickými vlákny; f - ohnisko sférického zrcadla ($2f = 2500$ mm); $f(L_1)$ - ohnisko objektivu kamery ($f(L_1) = 2300$ mm) sférické zrcadlo má poloměr křivosti 2500 mm, BŘIT - ostří žiletky uložené horizontálně, L_1 - zvětšovací objektiv kamery.

V tomto případě byl kladen důraz na jednoduchost a vysokou citlivost při použití kvalitního sférického zrcadla. Použité zrcadlo má ohniskovou vzdálenost $f = 125$ cm a průměr zrcadla $\phi = 22$ cm. To zajišťuje vhodné rozměry testovací oblasti i velmi dobrou citlivost i kontrast zobrazení. Zdroj světla i břit mají stejnou hodnotu souřadnice z (ve směru šíření svazku) jako střed křivosti zrcadla a jejich vzdálenost od optické osy v horizontální rovině je shodná, proto zvětšení obrazu zdroje v rovině břitu $m = 1$. Je přitom výhodné umístit světelný zdroj i břit co nejbližší optické ose. Jako zdroj světla byla použita bílá LED dioda. Jelikož používáme břit k získání schlierovského zobrazení, je velmi vhodné použít obdélníkového zdroje světla. V tomto případě bylo použito řady 20 velmi malých zdrojů (bodových zářičů) - čel optických vláken s rozměrem $h = 100$ μm , umístěných horizontálně a ekvidistantně. Toto řešení značně zvyšuje citlivost sestavy při dobré světelnosti

7.3.2 Příklad možného přístupu k určení citlivosti

Stanovení citlivosti jak je uvádí například G. S. Setles [74] je teoreticky popsáno v kapitole 6.9.1 *Citlivost a kontrast zobrazení* na stranách 46, 47. Pro určení citlivosti realizované sestavy je nejprve nutno určit celkový jas všech bodových zdrojů přípravku. Jako šířka zdroje b je následně použita vzdálenost vějších okrajů vnějších bodových zdrojů a výška zdroje h je rovna průměru bodového zdroje. Umístěním světelného zdroje přesně vzdálenosti středu křivosti je zajištěno zvětšení $m = 1$. Pro účel výpočtu je ohnisková vzdálenost zrcadla označena jako $f_1 = f$. Po výpočtu intenzity osvětlení detekční oblasti E_0 dosazením do rovnice (70) je vhodné

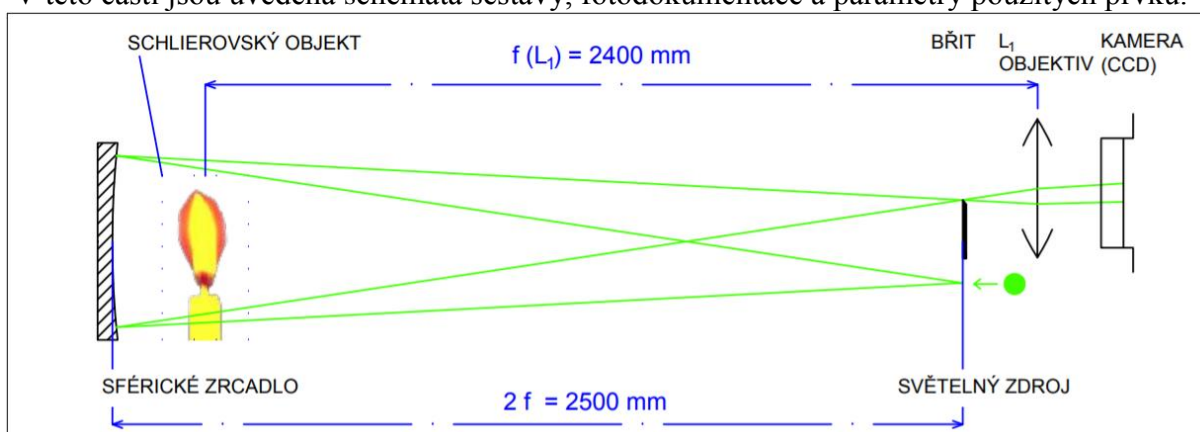
ověřit výsledek měření. Jako ohniskovou vzdálenost f_2 je nutné použít při výpočtu pro tuto sestavu ohniskovou vzdálenost objektivu kamery $f_2 = f(L_1)$. Následně je možné určit intenzitu osvětlení neovlivněných svazků E průchozích přes břit z rovnice (71), intenzitu osvětlení ovlivněných svazků ΔE průchozích přes břit z rovnice (72), kontrast zobrazení C z rovnice (73) a citlivost S ze vztahu (74). Obvykle se citlivost vyjadřuje jako nejmenší pozorovatelný úhel. G. S. Settles [74] prezentuje výsledky, které realizoval Sharyn a které demonstrují citlivost v rozdhah $\varepsilon_{min} = \langle 0,1'' ; 8'' \rangle$ pro jednozrcadlovou sestavu s ohniskovou vzdáleností $f_2 = 5,15 m$, což je přibližně dvojnásobek sestavy použité k měření v této práci.

7.3.3 Praktický postup činnosti

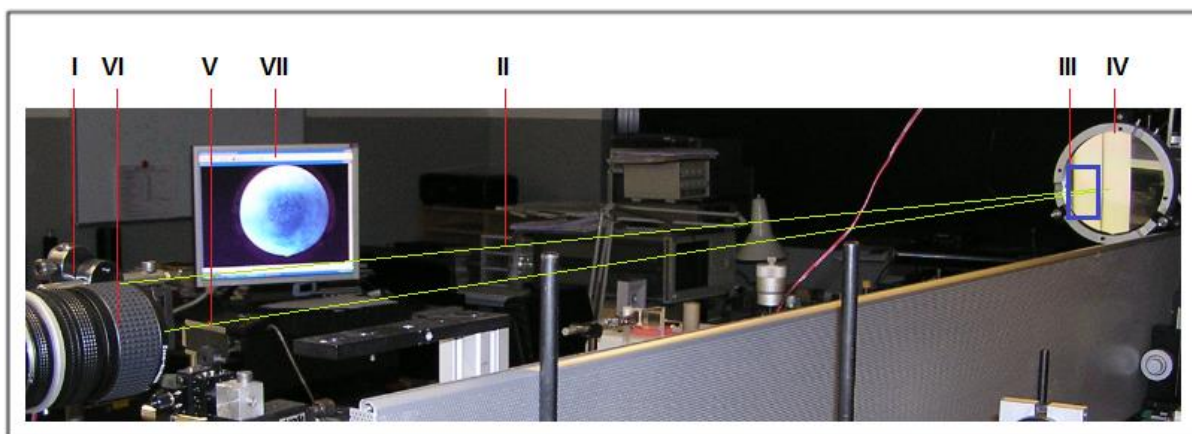
Nejprve budou uvedeny parametry sestavy, příklad justáže a následně záznamy měření.

7.3.3.1 Technická dokumentace sestavy pro schlierové zobrazení

V této části jsou uvedena schémata sestavy, fotodokumentace a parametry použitých prvků.

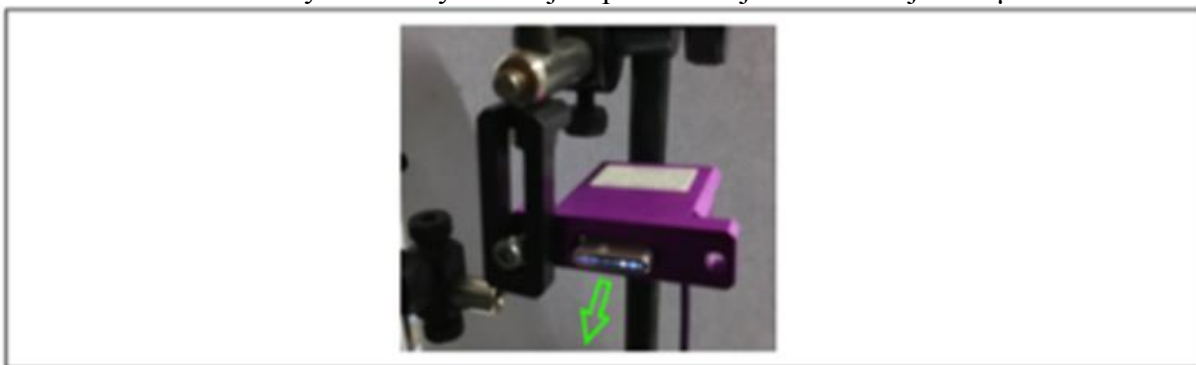


Obr. 94. - Schématické zobrazení schlierové sestavy "of axis" s prostorovým břitem
SVĚTELNÝ ZDROJ - čelo přípravku s 20 - ti optickými vlákny řazenými lineárně, ekvidistantně v jedné rovině s rovinou břitu (horizontálně), šířka přípravku je 250 mm (viz obr. 98), sférické zrcadlo má poloměr křivosti 2500 mm. Břit je realizovaný ostrím žiletky; L je zvětšovací objektiv kamery.



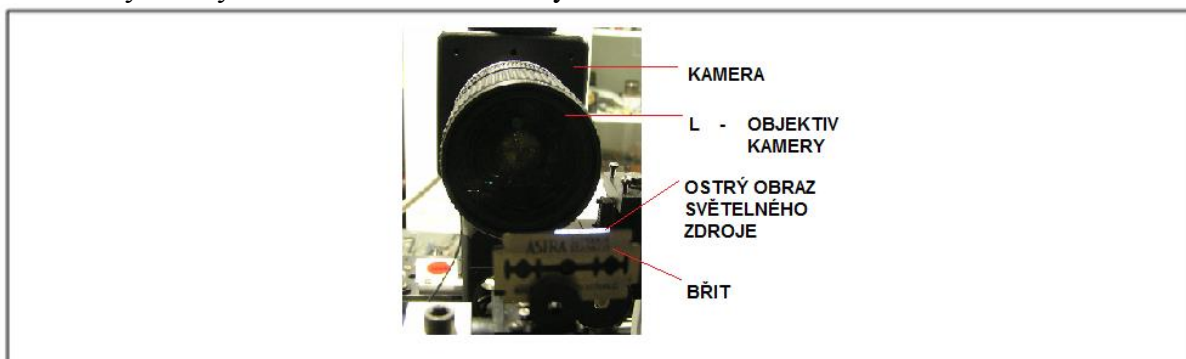
Obr. 95. - Fotografie sestavy se zrcadlem a prostorovým břitem.
I - SVĚTELNÝ ZDROJ - výstup z vlákna; II - naznačený chod paprsku; III - Testovací oblast, do které se při měření postaví SCHLIEROVSKÝ OBJEKT; IV - SFÉRICKÉ ZRCADLO - sférické zrcadlo se středem křivosti 2500 mm; V - BŘIT - Prostorový břit (realizovaný žiletkou); VI - L OBJEKTIV - objektiv kamery zaostřený na testovací oblast.

- Zdroj světla a zavedení do vlákna
Světelný výkon LED diody je navázán do optického vlákna pomocí kolimačního objektivu.
- Výstup z vlákna (světelný zdroj pro schlierové zobrazení) (obr. 95. - I)
20 ekvidistantně uložených bodových zdrojů s průměrem jednoho zdroje 100 μm .



Obr. 96. - Fotografie vícebodového světelného zdroje.

- Sférické zrcadlo (obr. 95. - IV)
Vysoce kvalitní sférické zrcadlo s ohniskovou vzdáleností $f = 1250$ mm a průměrem zrcadla $D = 220$ mm.
- Prostorový břit (obr. 95. - V)
Prostorový břit byl realizován ostřím žiletky.

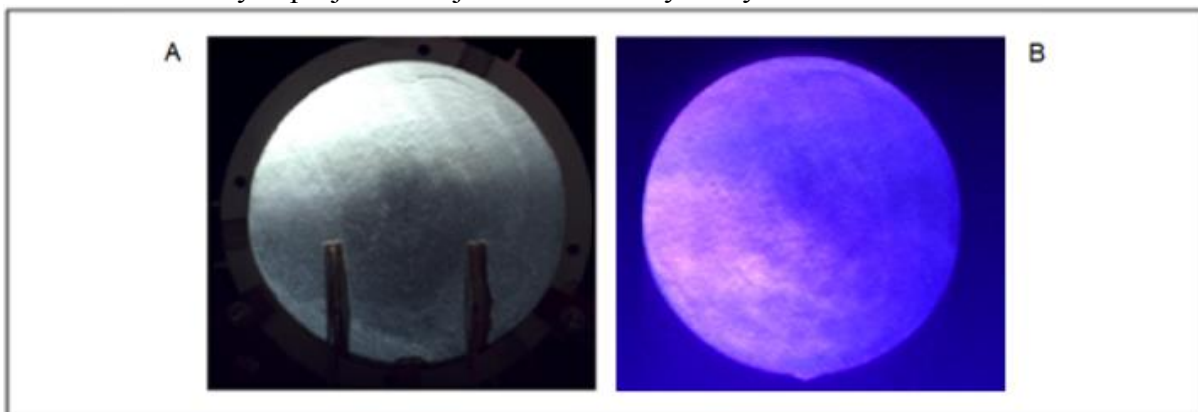


Obr. 97. - Fotografie prostorového břitu, objektivu a kamery

- L - OBJEKTIV KAMERY - zvětšovací objektiv s nastavenou ohniskovou vzdáleností do roviny shlierovského objektu. (obr. 95. - VI)
- KAMERA- HV-duo-10m podrobně popsána v kapitole 7.2.2.2 na straně 64.

7.3.4 Příklad justáže sestavy

Příklad dvou běžných projevů nezajustované sestavy ve výsledném zobrazení

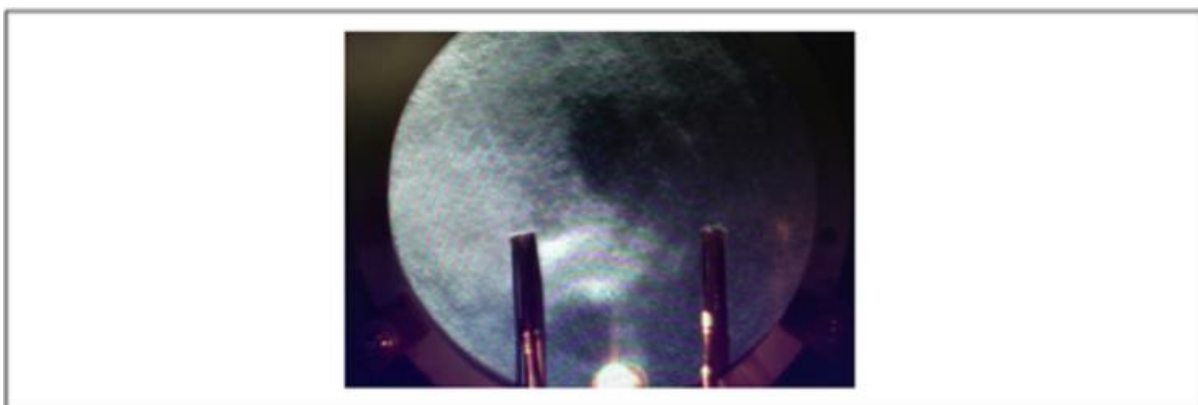


Obr. 98. - Příklad vad zobrazení před justáží.

A - Chybná poloha bříty, (břit je za bodem fokusu neovlivněných svazků) korekce dojustováním sestavy; B - Chybné vyvážení barev, je nutno provést “whitebalance” (vyvážení bílé barvy) v programu obsluhujícím kameru (automaticky, nebo manuálně) tak, aby zobrazení bylo věrné a současně vysoce kontrastní.

7.3.5 Provedená měření

7.3.5.1 Pozorování přenosu tepla vedením a zářením pomocí schlierové metody zobrazení



Obr. 99. - Zobrazení projevů přenosu tepla zářením a vedením vyobrazen.

Objekt měření, skládající se ze žárovky (uprostřed), načerněného terčíku (vlevo) a hliníkového terčíku (vpravo), před zrcadlem.

Měření studuje děje v okolí objektu na obr. 99. přípravek, skládající se z žárovky a dvou hliníkových terčíků identických rozměrů i konstrukce o ploše 5 cm^2 . Povrch terčíku vlevo na obr. 99. byl opatřen černým nátěrem. Vzdálenost terčíků od žárovky je 2 cm. Záznam (obr. 99.) je pořízen po 14. minutách provozu žárovky, při proudu 2A a napětí 10V. Podrobnější popis měření v kapitole 8.6 na straně 100-103.

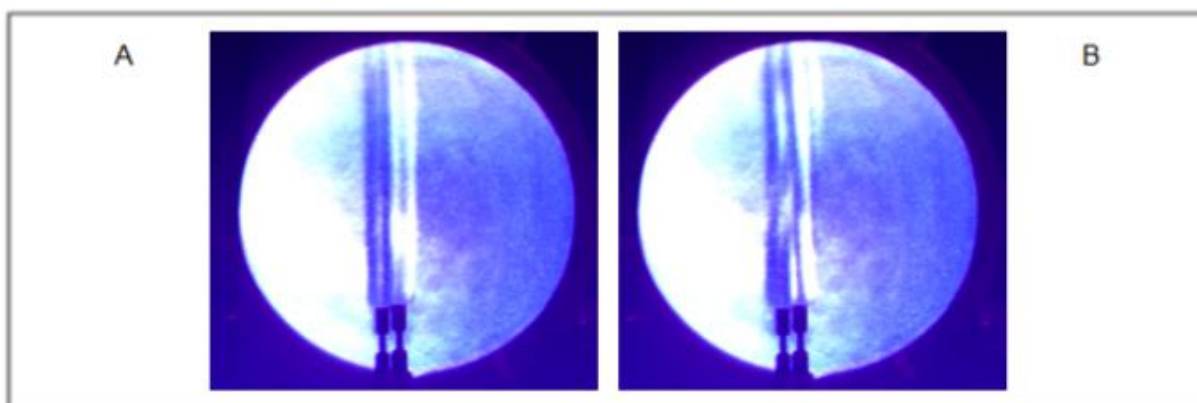
7.3.5.2 Pozorování plamene hořáku pomocí schlierové metody zobrazení

Hořák byl umístěn do detekční oblasti a pozorovány byly projevy hoření v okolním vzduchu, jako projevy tepelného proudění ve vzduchu. Na obr. 102. je názorně patrné parazitní zdvojení obrazu hořáku popsané v kapitole 5.8.5.2 na straně 39. Proud spalín a horkého vzduchu

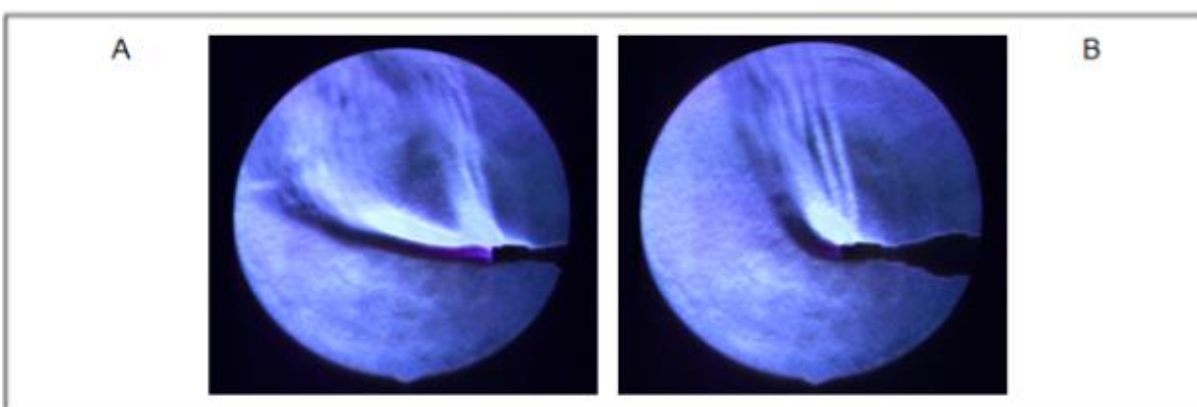
viditelně stoupá převážně laminárním prouděním. Na obr. 102 (při horizontálním upevnění hořáku) je patrný velký gradient indexu lomu pod prostorem plamene, tedy na rozhraní okolního vzduchu a projevů plamene, vyjádřený tmavým stínem. To naznačuje, že horký vzduch má nižší index lomu než okolní chladný vzduch. Tento ostrý přechod nad plamenem nepozorujeme. Dobře patrné jsou projevy turbulentního proudění.



Obr. 100. - Zobrazení vertikálně směřovaného hořáku.

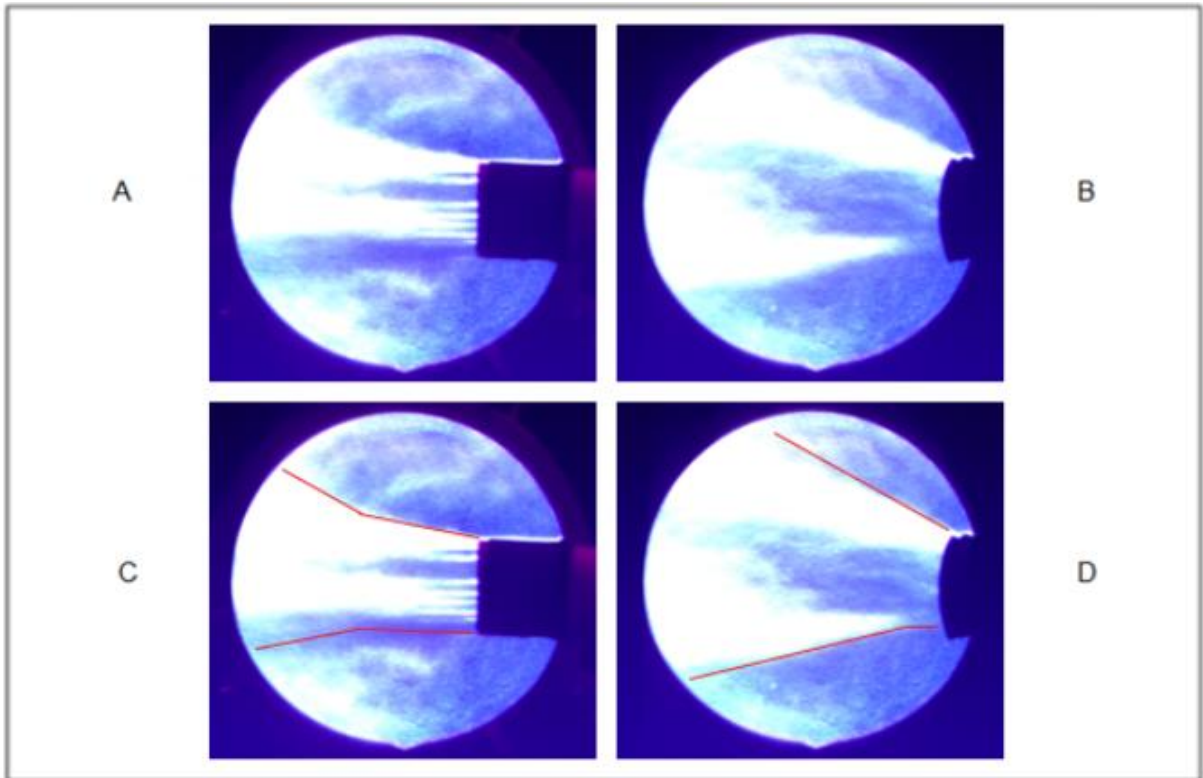


Obr. 101. - Zobrazení vertikálně směřovaného plamene hořáku.



Obr. 102. - Zobrazení horizontálně směřovaného plamene hořáku.

7.3.5.3 Vliv přípravku pro usměrnění fěnu z vysoušeče vlasů na projevy ve vzduchu pozorované schlierovou metodou zobrazení

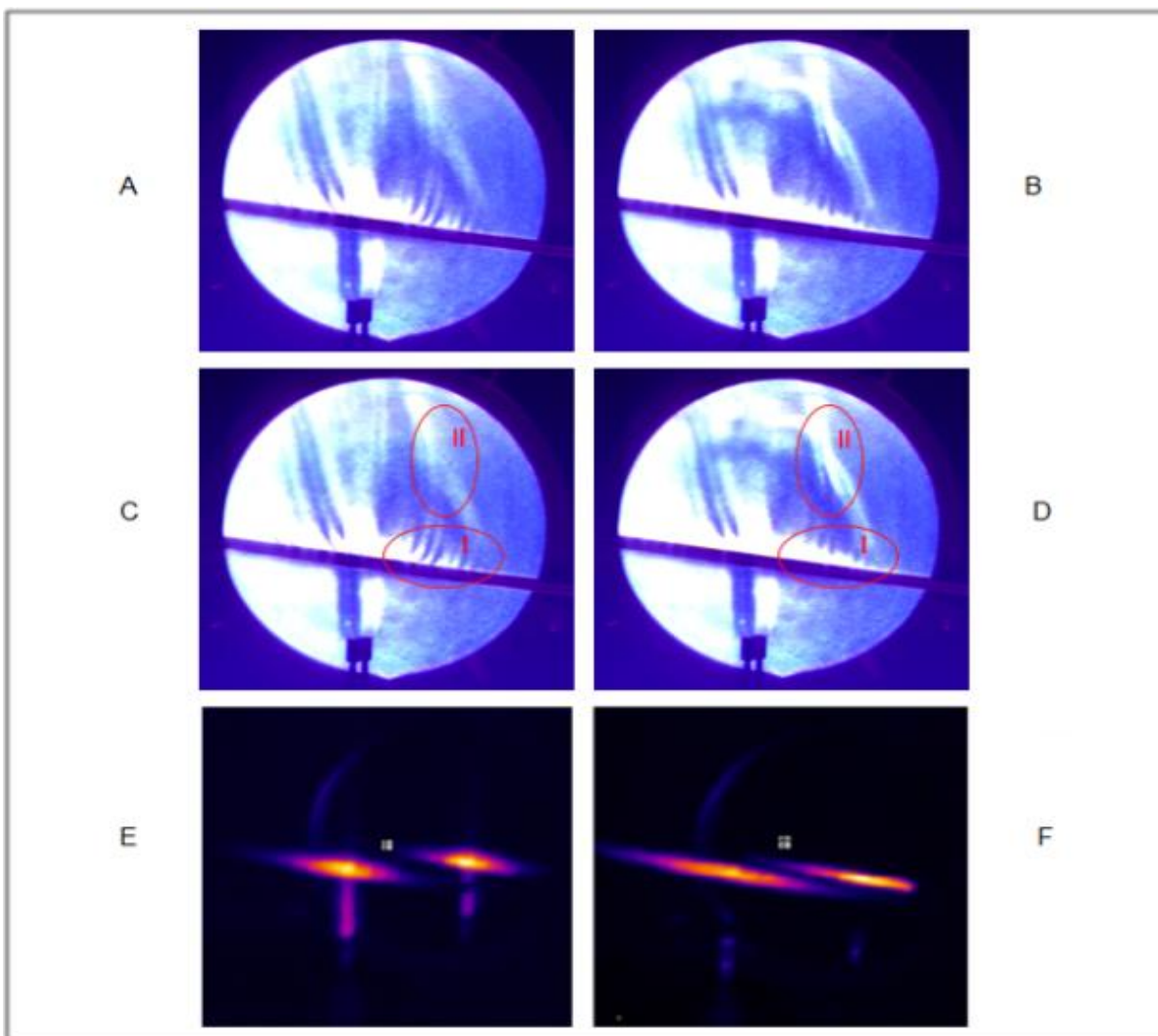


Obr. 103. - Zobrazení vlivu přípravku pro usměrnění proudu vzduchu z fěnu.

A - činnost přípravku na vytvoření laminárního proudění; B - proudění vzduchu z fěnu bez přípravku.

Přípravek je sadou tenkých kruhových trubiček o průměru 4 mm, které mají zajistit stejnou rychlost proudění vzduchu v celém proudu. Proud vzduchu je pak méně rozbíhavý (obr. 103 - A), nicméně rozhodnout, zda přípravek vytvoří laminární proudění, z provedených měření nelze. Na obr. 103. - B je záznam situace bez přípravku, zde se dá usoudit, že se jedná o turbulentní proudění.

7.3.5.4 Vedení tepla kovovým objektem a záznam jeho projevů



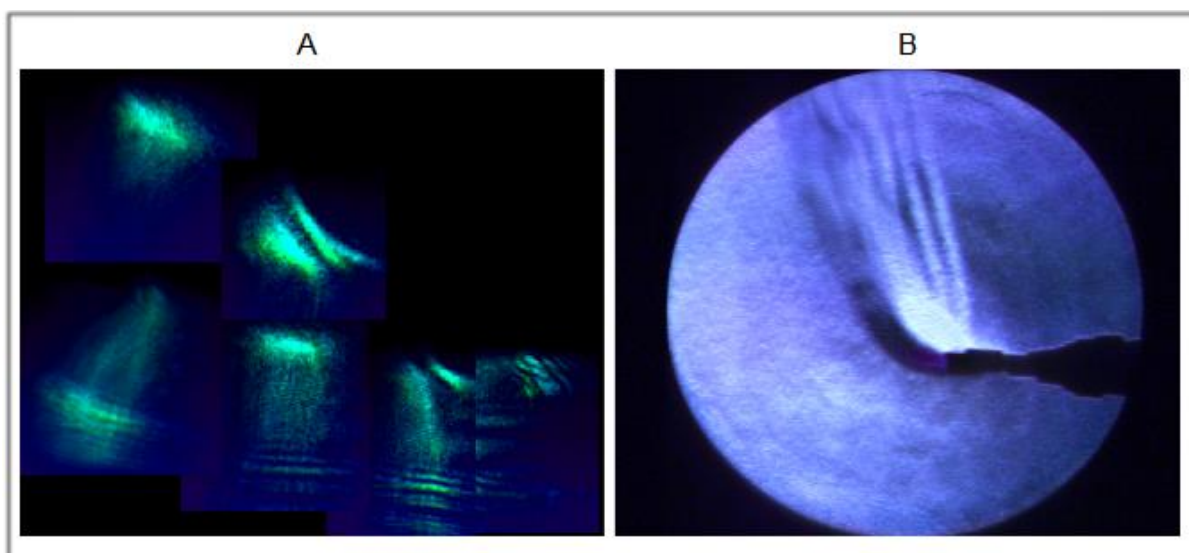
Obr. 104. - Zobrazení projevů vedení a proudění tepla - kondukce a konvekce tepla.
A, C - kovový objekt po 15 s zahřívání ;E - záznam z termokamery po 15 s zahřívání; B, D -
kovový objekt po 40 s;F - záznam z termokamery po 40 s;I,II - oblasti pozorovatelných změn

Kovový objekt byl uložen do detekční oblasti a pod kovový objekt byl umístěn hořák. Situace byla snímána termokamerou i schlierovou metodou zobrazení. V krátké době (15 s) došlo k silnému lokálnímu zahřátí objektu, jak je patrné na záznamu termokamery (obr. 104. - E.) Na obr. 104 - D - I můžeme pozorovat, že teplý vzduch pouze obtéká chladný objekt (výrazný přechod mezi horkým vzduchem a v blízkosti horního okraje objektu vyjádřený ostrým tmavým přechodem). Na obr. 104 - D - II lze pozorovat, že rozdíl mezi teplotou nad objektem a teplotou okolního vzduchu je minimální (přechod mezi teplým vzduchem nad objektem a okolím není výrazný). Po 40 s zahřívání objektu se situace výrazně změní. Je znázorněna pomocí obr. 104. - B, D, E. Proběhlo vedení tepla z oblasti plamene do dalších částí objektu. Oblast projevů tepelného proudění nad plamenem je větší, nad objektem v oblasti I již není patrný přechod mezi teplým vzduchem a okolím objektu, a naopak v oblasti II je patrný ostrý přechod mezi teplým vzduchem stoupajícím z objektu a okolním chladným vzduchem. Je vhodné upozornit také na rozdíl záznamu schlierového měření a měření termokamerou. Termokamera není citlivá na teplotu vzduchu nebo plamene ale dobře zaznamenává tepelné vyzařování pevných těles. Schlierová metoda je vysoce citlivá a dobře interpretuje distribuci tepla ve vzduchu, nebo v oblasti plamene. Při studiu tepelných dějů se proto obě metody vysoce efektivně doplňují.

7.3.6 Dílčí závěr - vyhodnocení měření na sestavě se sférickým zrcadlem

Druhou sestavou, na níž bylo prováděno měření v rámci práce, byla sestava se sférickým zrcadlem, využívající prostorového filtru - bříty. Sestava se sférickým zrcadlem a prostorovým břítem je konstrukčně jednodušší a princip činnosti se dá popsat s využitím geometrické optiky. Velikost detekční oblasti je limitována pouze velikostí použitého sférického zrcadla a rozměr soustavy je určen poloměrem křivosti zrcadla. Světelný zdroj a prostorový břit jsou uloženy vedle sebe, v rovině kolmé na osu zrcadla, ve vzdálenosti středu křivosti zrcadla, což je pro schlierové zobrazení touto sestavou nejvýhodnější. Došlo k ověření funkce sestavy a kvalitativnímu posouzení její použitelnosti pro zobrazování schlierovských objektů. Dalším benefitem je ostré zobrazení objektů v detekční oblasti a možnost kvalitativního určení, zda index lomu v oblasti roste nebo klesá (znaménko gradientu indexu lomu). Sestava je vysoce citlivá i na slabé schlierovské objekty a projevy schlier. Nevýhodou je zejména citlivost soustavy na gradient indexu lomu pouze v jednom směru. Pro použití této sestavy k demonstračním měřením se nejlépe hodí využití plamene jako schlierovského objektu. Značný potenciál poskytuje kombinace použití tohoto typu schlierové sestavy v kombinaci s termokamerou, protože poskytují vzájemně se doplňující informace o měřených objektech a procesech.

7.4 Srovnání výsledků



Obr. 105. - Srovnání výsledků měření na příkladu horizontálního měření „hořáku“
A - s diferenciálním břítem; B - prostorovým břítem

Je velmi náročné srovnávat obě aparatury. Ačkoli se jedná v obou případech o schlierové metody zobrazení, každá má zcela odlišný princip činnosti. Schlierová sestava s fázovým filtrem obr. 105 - A poskytuje o schlierovském objektu podstatně více informací, má však velmi malé zorné pole a výsledky takto změřené jsou vhodné zejména k dalšímu počítačovému zpracování. Hodí se pro pozorování drobných schlier. Na rozdíl od metody s prostorovým břítem umožňuje i zobrazení projevů pnutí v materiálu vlivem silového působení. Metoda se však více podobá metodám uplatňovaným v průmyslu a je vhodná pro studium polarizace, interference, difrakce, nebo při využití vlastností a možností Wollastonova hranolu.

Metoda využívající sférického zrcadla a bříty obr. 105. - B umožňuje vytvořit názornou a ucelenou představu o podobě schlierovského objektu i dějů v testovací oblasti. Vlivem velké testovací oblasti umožňuje pozorování větších předmětů. Názorně zobrazuje oblasti s rostoucím

nebo klesajícím indexem lomu ve směru citlivosti sestavy. Má velký potenciál jako didaktická pomůcka na základních, středních i vysokých školách, zejména v kombinaci s termokamerou. Zhodnocení vytyčených požadavků a kritérií

- Velikost zobrazované oblasti:
Zorné pole metody se sférickým zrcadlem je dostatečně velké pro provádění demonstračních experimentů. Sestava využívající fázového filtru zobrazuje jen malé zorné pole.
- Kontrast zobrazení a světelnost:
Při pozorování schlierovských objektů s výrazným gradientem indexu lomu je kontrastnější metoda s fázovým filtrem. Světelnost je také vyšší u metody s fázovým břítem. Nicméně při pozorování schlierovských objektů s malým či pozvolným gradientem indexu lomu (jako teplo stoupající od ruky, nebo žárovky) vykazuje lepší kontrast metoda s prostorovým břítem, čímž je v tomto bodě vhodnější pro prezentování většiny demonstračních experimentů.
- Mobilita:
Ani jednu sestavu se nepodařilo vytvořit v mobilní verzi. Překážkami jsou velké rozměry sestav, náročná justáž vyžadující velkou přesnost, ale i požadavky na stabilitu optické lavice.
- Tvar pole v detekční oblasti:
V detekční oblasti sestavy s fázovým břítem je homogenní a kolineární pole vzájemně kolmo polarizovaných komplementárních svazků. Jedná se o vysoce univerzální variantu, která umožňuje měření transparentních předmětů a potenciálně také měření s velmi kvalitními kyvetami či okénky, výhodné například při studiu chování plasmatu, nebo proudění při rychlostech blízkých rychlosti zvuku. Sestava se sférickým zrcadlem využívá dvojitého průchodu svazku detekční oblastí. Směr šíření dopadajícího a odraženého svazku svírají úhel 2° , což způsobuje parazitní obrazy předmětu, ale výrazně zvyšuje kontrast zobrazení i citlivost. Tento jev limituje možnost použití planparalelních vrstev, kyvet okének a podobně.
- Citlivost sestavy:
Obě sestavy byly citlivé i na slabé projevy schlierovských objektů.

8 Didaktické aspekty práce

Předmětem didaktické části této práce je zhodnotit možnosti využití schlierové zobrazovací metody v procesu výuky, předložit některé aplikace vhodné pro zvýšení efektivity dosažení výukových cílů a na vybraných příkladech demonstrovat jejich použití.

Didaktika je vědeckou disciplínou, která zkoumá problematiku vyučování a učení, jak zmiňují J. Fuka, O. Lepil a M. Bednařík [27]. Jednou z prvních osobností, které se zabývaly didaktikou na území českých zemí, byl J. A. Komenský, jak zmiňují Z. Kalhous a O. Obst [44]. Podle [44] pochází první zmínky o jeho díle Didaktika česká z roku 1632 a J. A. Komenský zde vymezuje didaktiku takto: „*Docendi artificium, to jest umění o umění aneb o umělém vyučování mládeže v uměních, jazyků a moudrosti, a to snadno, jakoby hrou*“ (J. A. Komenský, 1871, s. 15). Již v tomto díle je patrný důraz na princip názornosti při procesu vyučování. Až 87 % informací přijímáme vizuální formou, z čehož by se dalo usoudit, že obrazový vjem je pro učení nejdůležitější. Pro zajištění efektivního procesu učení je však podstatná kombinace smyslových vjemů, což musí být při přípravě výuky zohledněno Základem úspěšného a efektivního procesu výuky je kvalitní stanovení výukového cíle. [63], [23]

Obst [60] uvádí, že kvalitně stanovený cíl splňuje tyto požadavky:



Obr. 106. - Požadavky na výukové cíle.

Při formulaci výukových cílů i v všech ostatních fázích procesu výuky musí učitel dodržovat didaktické zásady vyučování, které uvádí R. Holubová [35] takto:



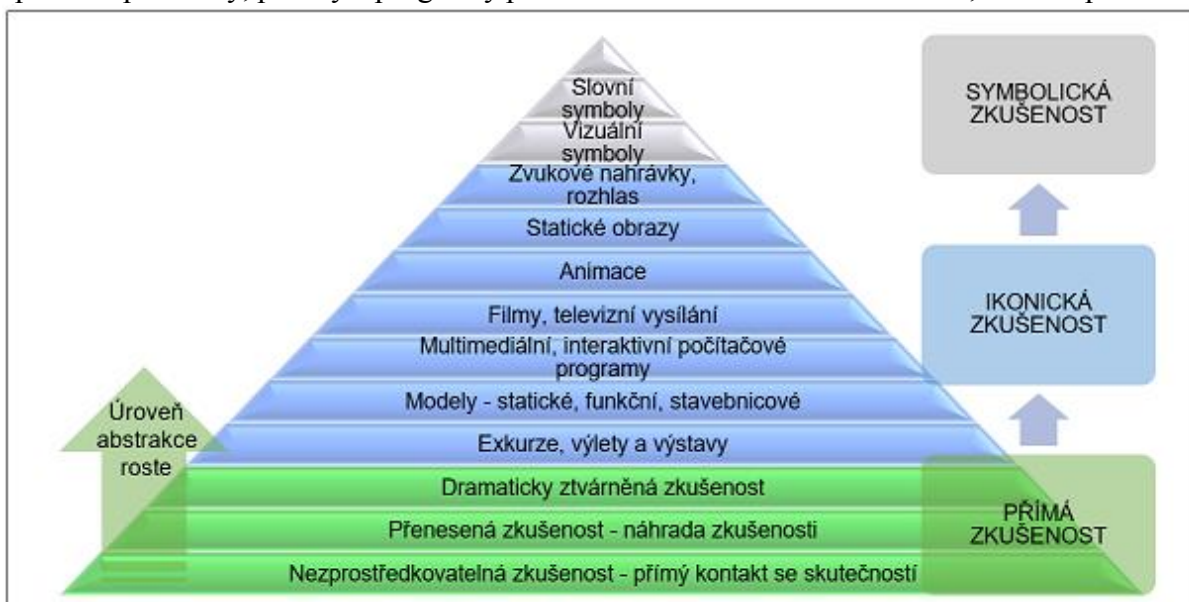
Obr. 107. - Didaktické zásady vyučování.

Vyučovací zásady napomáhají přehlednosti vyučovacího procesu a jeho vyšší efektivitě. Jejich dodržování je základním požadavkem určujícím charakter vyučovacího procesu. K použití

schlierové metody zobrazení se vztahují zejména zásada spojení teorie s praxí v případě žáků středních a studentů vysokých škol, protože měření schlierovými metodami je součástí praxe i technických oborů, zejména pak strojírenství, mechanika tekutin a studium chování plasmatu; ale i součástí oborů biologie, využití v mikroskopech; mineralogie, při studiu krystalických struktur; nebo chemii, při analýze sloučenin a popisu reakční kinetiky. Schlierové zobrazovací metody napomáhají plnit zásadu názornosti. Mohou napomoci vytvoření reálných zkušeností a představ o chování tekutin, povaze zvuku, nebo například tepelných dějích, což jsou témata vysoce abstraktní, a proto často náročná na představu a správné pochopení studenty. Mohou vznikat miskoncepty, či alternativní koncepty, které mohou mít negativní vliv na plnění výukových cílů nebo jejich konzistentnost. Popsaný jev můžeme odstranit vhodným snížením abstrakce (například experimentem) a správným výkladem. K efektivnímu naplnění stanovených výukových cílů může učitel využít didaktické prostředky.

8.1 Didaktické prostředky a úroveň jejich abstrakce

O. Obst [44] uvádí, že v didaktice rozumíme prostředkem vše, čeho učitel a žáci mohou využívat k dosažení výukových cílů. Mezi didaktické prostředky lze tedy zařadit experimenty, veškerá média, vizuální či auditivní techniku, učební pomůcky, ale i metody výuky, vyučovací formy, didaktické zásady, nebo učební prostory, či dokonce dosažení dílčího cíle a podobně, jak zmiňuje J. Dostál [23]. V. Rambousek [66] člení pomůcky podle úrovně abstrakce: originální předměty a reálné skutečnosti, zobrazení a znázornění předmětů a skutečností, speciální pomůcky, pořady a programy prezentované didaktickou technikou, textové pomůcky.



Obr. 108. - Abstrakční kužel a úroveň abstrakce přijímaných informací. Převzato z [23].

Při výuce je žádoucí přiměřeně snižovat úroveň abstrakce. Pro pochopení učiva žákem je často nejvýhodnější přímá zkušenost. V tomto směru je zařazení experimentů a názorných příkladů výhodné. Musí se však dbát na přiměřenost věku žáků i důsledné sledování výukových cílů.

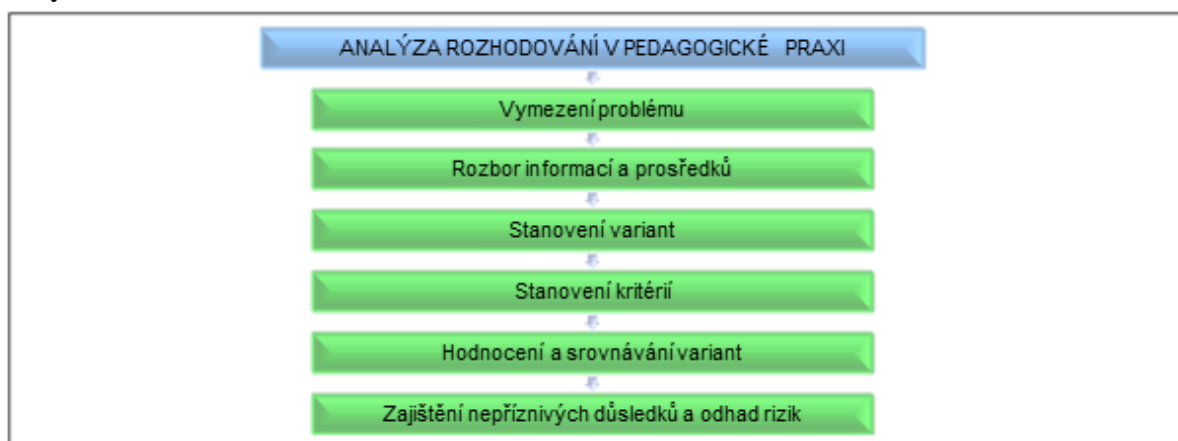
8.2 Stanovení metod a forem ve výuce fyziky

Fyzika jako vědní obor studuje děje, k nimž dochází ve světě kolem nás. Dělí se na fyziku experimentální a teoretickou. Během vědeckého bádání jsou teorie potvrzovány, nebo vyvráceny vhodnými experimenty, eventuálně jsou fyzikální zákony a vztahy formulovány na základě provedených experimentů. V průběhu studia fyziky na všech úrovních školské soustavy

je kladen důraz zejména na teoretickou oblast fyziky popisující děje a stavy pomocí vztahů fyzikálních veličin. Je vhodné probírané děje demonstrovat experimentálně, a je-li to možné, vyvozovat fyzikální zákonitosti z provedených experimentů. V rámci mezioborových vztahů také technické předměty uplatňují a aplikují principy, vztahy a zákony, které fyzika popisuje a zkoumá, což je vhodné při výuce zohlednit. [94]

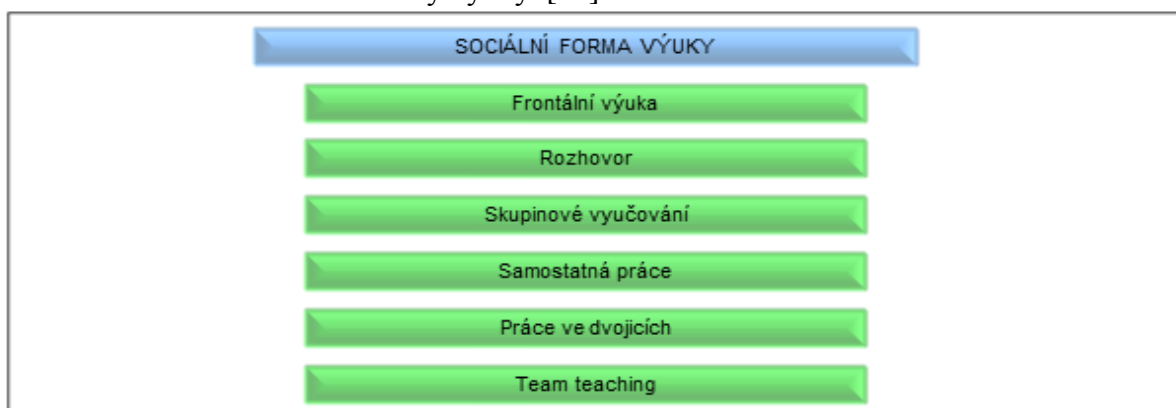
Ve výuce fyziky je velmi důležité snažit se o co největší názornost a minimalizovat úroveň abstrakce při výkladu, zejména na školách primárního a sekundárního vzdělávání. Jedním z prostředků, jež je možno v tomto směru uplatnit, je experiment. Živý experiment působí na více smyslů a projevuje se i motivačně. [63], [35]

Každý učitel se musí v pedagogické praxi rozhodovat, jaké metody, formy a pomůcky využije pro dosažení výukových cílů. K popisu procesu rozhodování v pedagogické praxi přistoupil S. Ryse [71] takto:



Obr. 109. - Analýza rozhodování v pedagogické praxi.

Aby mohlo být použití schlierových metod zobrazení efektivní, musíme si použití metody zasadit do kontextu sociální formy výuky. [35]



Obr. 110. - Sociální formy vyučování.

Schlierové zobrazovací metody lze využít pro všechny uvedené formy výuky, nicméně chceme-li zdůraznit zvýšení didaktické efektivity, pak se jako méně vhodná jeví samostatná práce. Volba práce ve dvojicích by byla přinejmenším odvážnou, s ohledem k pořizovací ceně některých komponentů sestavy, ale i s ohledem na zásadu přiměřenosti výukového cíle. Použití schlierové metody by bylo vhodné jako doplněk frontální výuky, námět k rozhovoru, kladení otázek učitelem či podněcování žáků ke kladení relevantních a smysluplných otázek směřujících k dosažení výukového cíle. Je možné i provádění experimentu se staršími žáky (na střední škole) formou skupinového vyučování. Tato varianta by byla velmi vhodná pro výuku

nadanějších, nebo specializovaných žáků, například v odborném semináři. Forma výuky “team teaching” je spíše experimentální a z hlediska pedagogické praxe je její výskyt ojedinělý.

Pro získání ucelené představy o průběhu hodiny je nutno zavést pojem metoda výuky. R. Holubová [35] uvádí metodu výuky jako záměrný postup, způsob práce, získávání nových poznatků. Zmiňuje, že metody lze klasifikovat například podle aspektu didaktického - (podle pramenů ze kterých žáci čerpají informace), aspektu logického - (z pohledu myšlenkových operací), a aspektu procedurálního - (z hlediska fází vyučovacího procesu) a to následujícím způsobem:

ASPEKT DIDAKTICKÝ	ASPEKT LOGICKÝ	ASPEKT PROCESUÁLNÍ
<ul style="list-style-type: none"> •Metody názorně-demonstrační •Metody praktické •Metody slovní 	<ul style="list-style-type: none"> •Metody logických postupů při výuce •Analyticko-syntetická •Induktivně-deduktivní •Genetický (vývojový) postup a dogmatismus •Analogie •Problémová metoda 	<ul style="list-style-type: none"> •Utváření nových zkušeností •Metody upěvňování a prohlubování učiva •Metody prověřovací a hodnotící

Obr. 111. - Aspekty vyučovacích metod

Ve smyslu tohoto členění je pravděpodobné, že by byly schlierové metody zobrazení použity na základních a středních školách jako metody názorně demonstrační.

8.3 Didaktická analýza učiva

Pedagog při utváření koncepce vyučovací jednotky a stanovení výukových cílů vychází z řady specifických poznatků vztahujících se k tematickému celku, nebo zamýšlenému tématu vyučovací jednotky. Musí zohlednit například: vlastní znalost oboru, takzvanou pedagogickou znalost oboru, znalost kurikulárních dokumentů a vzdělávacích cílů, obecné didaktické a pedagogické poznatky, znalost žáků, znalost kontextu a situace, v níž vyučování probíhá, i znalost předpisů a pravidel, jimiž se školství řídí. Tento soubor kompetencí je specifický pro jednotlivé vyučovací předměty. Souhrnně je v práci Z. Kalhouse a O. Obsta [44] zaveden jako ”pedagogická znalost učiva” a vytváří rozdíl mezi informováním a vyučováním.

Didaktická analýza učiva má více složek, pro tuto práci je stěžejní složka obsahová, která se zaměřuje na zjednodušení vědeckých informací a volbu témat způsobem, vhodným pro žáka. Při realizaci obsahové analýzy je nutné dodržení didaktických zásad vyučování v kapitole 8 na straně 88. Úkolem učitele je nalézt vhodné didaktické prostředky a pomůcky, podrobněji zpracované v kapitole 8.1 na straně 89, zhodnotit vědecké poznání a zvolit formy a metody co nejpřístupnější pro žáka, s ohledem na jeho věk úroveň poznání i pedagogickou znalost učiva. Učitel by měl v této části zvážit realizovatelnost, způsob provedení a přínos metod k dosažení výukových cílů a může zde zvážit také přínos použití schlierových metod zobrazení. [35]

8.4 Experiment ve výuce fyziky

Výukovým prostředkem s velmi malou úrovní abstrakce ve výuce fyziky je experiment. U fyzikálního experimentu je zdůrazněn jeho gnozeologický význam. Uplatňují se

demonstrační pokusy prováděné učitelem, frontální žákovské pokusy prováděné skupinami žáků a laboratorní úlohy, které mají ráz kontrolní zkoušky. [55]

Rozdělení experimentu podle Svoboda, Kolářová [83]:

ZAMĚŘENÍ	PROVEDENÍ	LOGICKÉ POVAHY	DIDAKTICKÉ FUNKCE
<ul style="list-style-type: none"> • Demonstrační • Žákovské • Frontální • Skupinové • Individuální • Domácí práce • Laboratorní úlohy 	<ul style="list-style-type: none"> • Reálné • Myšlenkové 	<ul style="list-style-type: none"> • Kvalitativní • Kvantitativní 	<ul style="list-style-type: none"> • Heuristické (objevitelské) • Verifikační (ověřovací) • Expoziční (ilustrační) • Motivační • Aplikační • Diagnostické

Obr. 112. - Dělení experimentů prováděných ve výuce

Jakkoli je nejpřímějším kontaktem studentů s fyzikální realitou experiment prováděný žáky, z důvodů efektivity výukového procesu i lepší kontroly nad dosahováním výukových cílů, volíme častěji v průběhu vyučovací jednotky experiment demonstrační.

8.4.1 Demonstrační experiment

Ve výukovém procesu je nejběžnější formou experimentu experiment demonstrační. Je prováděn učitelem. Možnosti demonstračního experimentu a jeho zařazení podle hlavních didaktických funkcí:

Heuristické (poznávací, nebo vyvozovací), které jsou řazeny před, nebo v průběhu expoziční fáze vyučování a ve spolupráci se žáky užíváme induktivní metodu vyučování.

Ověřovací, které následují po expoziční fázi, a vztahují se k upevňování učiva nebo k potvrzení výkladu v expoziční fázi, pak se jedná o metodu deduktivní. [27], [35], [55], [83]

8.4.2 Tvorba vzdělávacích cílů zohledňujících zařazení experimentu

Výklad nového učiva je založen na pozorování, tj. demonstračních učitele, nebo na frontální a laboratorní práci žáků. Na základních a středních školách se omezuje teoretické odvozování učiva s použitím matematických prostředků jen na vhodné a účelné případy. Pouhé teoretické vyvozování všeho učiva je nepřijatelné. Při výkladu nového učiva se vychází především z experimentu. Demonstrační experiment má nezastupitelnou úlohu při osvojování nových kompetencí, zejména kognitivních, a je nezastupitelný při objasňování činnosti zařízení, nebo při popisu dějů a procesů. Základními cíli, jež plní, jsou pozorování jevu, ověření vyslovené hypotézy, objasnění fyzikální zákonitosti a z ní plynoucích důsledků. Demonstrační experiment působí na žáky v rovině kognitivní i afektivní. Správné provádění demonstračních experimentů napomáhá zejména dosažení afektivních cílů, vztahujících se k přijímání nutnosti pečlivé a přesné práce při laborování a zvnitřňování pocitu zvědavosti. V psychomotorické rovině pak mohou demonstrační experimenty působit na žáky předvedením správné práce s laboratorní technikou, které mohou aplikovat v praktických laboratorních úlohách formou nápodoby, a to i v jiných, než-li demonstrovaných experimentech. Demonstrační experiment by měl splňovat některé požadavky, formální i obsahové. Experiment musí být vědecky správný, v tomto případě je podstatným faktorem, že experiment probíhá ve specifických podmínkách s cílem demonstrovat vybrané znaky jevu, což může experiment zkrasit. Je nezbytné se této chyby vyvarovat, protože takto provedený experiment postrádá význam. Cíl pokusu i motivace by

měla být žákům známá. V případě heuristických pokusů, by učitel měl žákům vhodnou formou předložit problém, jež bude experimentálně řešen. Pokus musí být názorný, přesvědčivý a žákům srozumitelný obsahově i formálně. Demonstrace více variant téhož pokusu není obvykle nutná ani užitečná. Experiment nesmí být příliš dlouhý. Experiment musí být pro všechny žáky dobře pozorovatelný. Dnešní vizualizační technika umožňuje promítnout experiment snímaný kamerou v reálném čase. Je nutno dbát vhodně zvoleného úhlu i záběru kamery. Experiment formou videozáznamu, zvýší úroveň abstrakce v porovnání s experimentem prováděným a prezentovaným přímo v reálném čase. [27], [55]

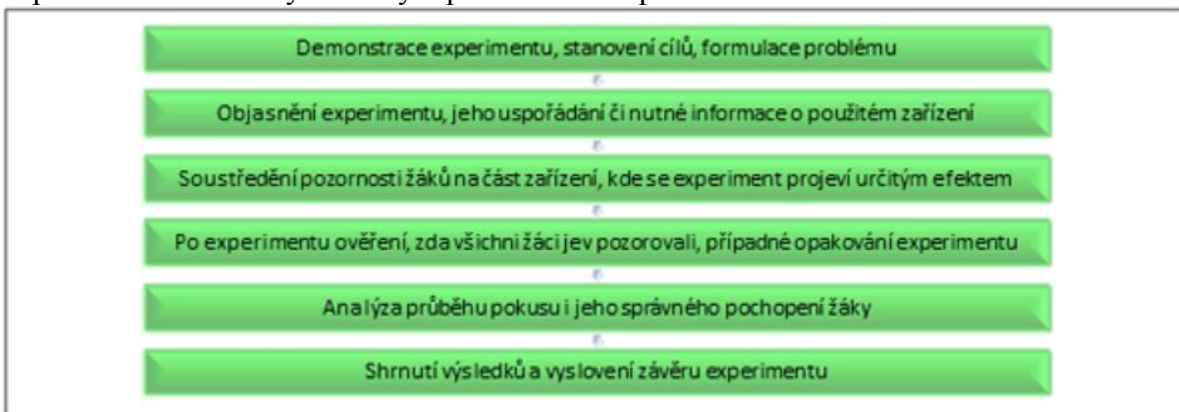
8.4.3 Fáze při zařazení experimentu do výuky

O. Obst [61] uvádí, že z didaktického hlediska má výuka učiva 5 fází:



Obr. 113. - Fáze výuky

Z tohoto hlediska je možné experiment obecně zařadit do všech fází výukového procesu, bude - li využito vhodných metod a sledovány výukové cíle. Experimenty využívající schlierovu zobrazovací metodu, jsou velmi vhodné jako prostředek motivační, eventuálně pro doplnění učiva názorným reálným příkladem v expoziční fázi.



Obr. 114. - Fáze demonstračního experimentu. Převzato z [27].

Z hlediska využití schlierových metod zobrazení je důležité soustředit pozornost na projevy pozorovaných jevů, zejména při demonstraci experimentu mladším žákům, nebo ze záznamu, bývá nutné experiment provázet kvalitním komentářem a správným způsobem zaměřovat pozornost žáků. Důraz musí být kladen i na analýzu a správné pochopení žáky. Naproti tomu objasnění principu experimentu a popis činnosti schlierové zobrazovací sestavy by mohl být zejména pro žáky na základní škole poněkud náročný a při použití schlierové zobrazovací metody, jako nástroje pro zobrazení jevů, až kontraproduktivní. V tomto smyslu musí učitel zvážit schopnosti vyučovaných žáků a výklad přizpůsobit jejich možnostem a potřebám. V práci [27] se dále diskutují možnosti umístění experimentu vertikálně či horizontálně tak, aby

byl co nejlépe viditelný, respektoval prostor v učebně i rozložení pomůcek a tabule. V tomto ohledu je provádění většiny experimentů s využitím sestav schlierového zobrazení limitováno povahou schlierovského objektu, nebo konstrukčních parametrů sestavy. Omezení použitelnosti způsobují též vibrace, požadavky na stabilitu sestavy, doba nutná k justování sestavy a podobně. Experimenty se schlierovým zobrazením je možné prezentovat ze záznamu nebo přímým provedením.

8.5 Zařazení schlierových zobrazovacích technik do výuky fyziky

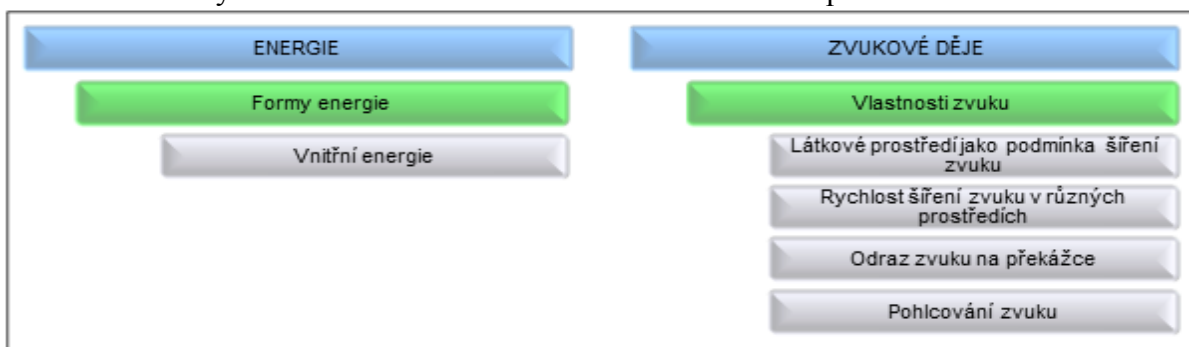
Fyzika je ukotvena ve vzdělávací oblasti Člověk a příroda. Jak bylo uvedeno v kapitolách 8.1 a 8.4, důležitou součástí výuky fyziky je zařazení experimentů a demonstrací probíraného učiva, což zvyšuje efektivitu procesu učení a napomáhá dosažení výukových cílů.

8.5.1 Témata vhodná pro aplikaci schlierových metod ve výuce fyziky řazená dle stupně vzdělávání

Základním dokumentem, určujícím obsah vzdělávání v České republice, je rámcový vzdělávací program - RVP. V rámci této práce bude následovat příklad posouzení možností uplatnění schlierových metod zobrazení v kontextu RVP pro základní školy a RVP pro gymnázia. V části navrhuje možné využití na vysoké škole se práce bude zabývat školami s technickým, nebo přírodovědným zaměřením. Vyšší odborné školy nejsou zahrnuty v této úvaze, vzhledem k jejich silné specifikaci a z ní plynoucích specifických potřeb a nároků na výuku. Nicméně na technických vyšších odborných školách, v závislosti na zaměření školy, by bylo možno provádět vybrané experimenty ze sekce středoškolského vzdělávání i vysokoškolského vzdělávání. Experimenty a měření je vždy nutno přizpůsobit výukovým cílům, věku a schopnostem žáků.

8.5.1.1 2. stupeň základního vzdělávání

V tomto období se žáci poprvé seznamují s popisem světa kolem nás pomocí nástrojů fyziky. Je vhodné vést výuku velmi názorně a užívat demonstračních experimentů.



Obr. 115. - Výpis RVP. ZŠ.

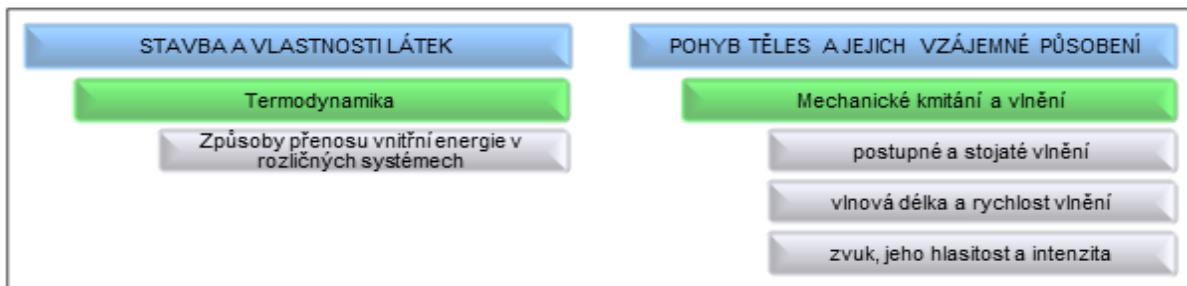
Učivo s potenciálem uplatnění schlierových metod zobrazení. Vzdělávací obsah - modře, Učivo - zeleně, Tematické okruhy - šedě.

Příklady možných experimentů vhodných k prezentaci, zejména jako rozšiřující učivo, nebo doplněk výkladu a motivace žáků k dalšímu studiu (neshoduje se s RVP):

- Tepelný vodič, tepelný izolant, vedení tepla, tepelná výměna vedením (Termika)
- Tepelná výměna zářením a prouděním (Termika)
- Vizualizace stojatého mechanického (zvukového) vlnění ve vzduchu
- Vizualizace odrazu zvukového vlnění ve vzduchu

8.5.1.2 Středoškolské vzdělávání

Ukotvení tematických okruhů s potenciálem zařazení experimentů využívajících schlierových metod zobrazení v rámci RVP



Obr. 116. - Výpis RVP. - GYMNÁZIA.

Učivo s potenciálem uplatnění schlierových metod zobrazení. Vzdělávací obsah - modře, Učivo - zeleně, Tematické okruhy - šedě.



Obr. 117. - Výpis RVP. - GYMNÁZIA.

Učivo s potenciálem uplatnění schlierových metod zobrazení. Vzdělávací obsah - modře, Učivo - zeleně, Tematické okruhy - šedě.

Příklady možných experimentů. V tomto případě v závorce nadpisy kapitol běžně používaných učebnic pro gymnázia [6], [5], [53], [54] (neshoduje se s RVP):

- Odpor vzduchu, obtékání tělesa (Mechanika kapalin a plynů)
- Laminární a turbulentní proudění (Mechanika kapalin a plynů)
- Proudění reálné kapaliny trubicí (Mechanika kapalin a plynů)
- Postupná vlna a stojaté vlnění, odraz zvuku, vizualizace zvuku (Akustika)
- Rychlost zvuku ve vzduchu a ve vodě (Zvukové vlnění)
- Difuze v tekutých látkách (Kinetická teorie látek)
- Přenos tepla (Termodynamika)
- Namáhání průhledného ingotu tlakem, ohybem (Tuhé těleso)
- Pozorování difrakce (Vlnová optika)

8.5.1.3 Vysokoškolské vzdělávání

Příklady experimentů v této části by měly reflektovat potřeby a požadavky na praktické dovednosti a využitelnost poznatků. V této části jsou příklady experimentů děleny na experimenty, při jejichž realizaci je schlierová metoda zobrazení nástrojem pozorování a měření, a tematické kompetence, které by mohly být rozvíjeny studiem schlierových metod a jejich aplikací.

Experimenty s využitím schlierových metod zobrazení

- Vlastnosti zvuku - změř a výpočtem urči polohu uzlů a kmiten stojatého vlnění
- Vedení tepla materiálem včetně tepelných ztrát do okolí
- Stanovení termodynamické rovnováhy systému
- Důkaz Bernoulliho rovnice měřením proudění reálné kapaliny v trubici
- Měření namáhání průhledného materiálu
- Tepelná analýza plazmatu
- Parametry proudění plynu/plazmatu z trysky
- Vyšetřování kavitačních jevů kapalin

Rozvoj znalostí a dovedností sestavami schlierovského zobrazení při výuce

- Manipulace s kontrastem mikroskopu, diferenciální a polarizační mikroskopie
- Pozorování a měření prostředí s nespojitou změnou indexu lomu
- Využití difrakce na břítu a studium jejího vlivu na zobrazení optickou soustavou
- Užití Wollastonova hranolu jako součást diferenciálního interferometru a fázového filtru
- Studium polarizace světla, podmínek interference a difrakčních jevů

8.5.2 Metodika vybraných úloh s využitím schlierových metod

V této části budou navrženy vybrané vhodné aplikace a jejich způsob zařazení do výuky. V práci je zpracován způsob zařazení na základní střední i vysoké škole na příkladu vybraných vhodných úloh. Je snaha přizpůsobit didaktickou analýzu příslušnému stupni vzdělávání a proto nemá v jednotlivých případech jednotnou formu.

8.5.2.1 Vizualizace odrazu zvukového vlnění ve vzduchu

Zařazení: 2. stupeň základních škol a nižší gymnázia -> Mechanické kmitání a vlnění -> postupné a stojaté vlnění, zvuk. Vhodné je nejprve probrat příčné a stojaté vlnění a takto koncipovanou jednotku zařadit následně.

Cíle výukové jednotky: žák si zapamatuje, že zvuk je postupné podélné vlnění v prostředí; žák popíše podstatu zvukového vlnění, amplitudu, frekvenci a vlnovou délku i jejich význam; žák si zapamatuje, že zvuk se může odrážet i šířit za překážkou v geometrickém stínu, nebo utvořit stojaté vlnění; žák zná zpaměti a používá vztah mezi rychlostí zvuku v daném prostředí, vlnovou délkou zvuku a frekvencí zvuku a správně manipuluje s veličinami i jednotkami.

Využití didaktické pomůcky schlierových metod zobrazení zvuku: názorně demonstrační; induktivní; utvářející nové zkušenosti. Experimenty provedeny demonstračně; reálně; kvalitativně; expozičně a motivačně, jako názorné doplnění výkladu v expoziční fázi hodiny.

Průběh vyučovací jednotky-Expozice učiva zvukové vlnění: Zvukové vlnění, (v prostředí bez překážek), je postupným podélným vlněním, jehož podstatou jsou periodické změny tlaku v prostředí. Šíří se rychlostí zvuku, která je specifická pro dané prostředí a závisí na jeho hustotě. Zvukové vlnění se vyznačuje amplitudou vlny, frekvencí (vlnovou délkou a rychlostí šíření), ale i jinými vlastnostmi, (rozšiřující informace: jako je barva zvuku profil vyšších harmonických tónů, nebo modulace). Zvukové vlnění se může odrážet, může docházet k ohybu, nebo (rozšiřující informace: vytvářet stojaté vlnění). Protože se jedná o projev periodické změny tlaku, nemůže se zvuk šířit ve vakuu, k šíření potřebuje částice a je možné jej zviditelnit pomocí některých optických metod. (rozšiřující informace: Metody citlivé na změny tlaku / hustoty / indexu lomu, za současného využití efektu stroboskopu o shodné frekvenci jako je frekvence zvukového vlnění, umožňují vizualizovat změny tlaku ve vzduchu ve stejný, periodicky se opakující okamžik). Je možné tak zobrazit zvukové vlny „zamrzlé v prostoru“.

Lidské ucho slyší zvuky o frekvenci přibližně 16 Hz - 20 kHz. Nižší frekvence jsou označovány jako infrazvuk a vyšší frekvence jako ultrazvuk. Lidé neslyší ultrazvuk, ani infrazvuk, ale některá zvířata mohou. Rychlost šíření zvuku vzduchem je přibližně $v = 331,82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, pak je vlnová délka těchto vln λ (m) určena pro zvukové vlnění o známé frekvenci f (Hz) takto:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (99).$$

Vypočtěme nyní vlnovou délku zvukového vlnění o frekvenci 16 Hz ve vzduchu:

$$\lambda = \frac{331,82}{16} \text{ m} = 20,739 \text{ m} \quad (100).$$

Vypočtěme nyní vlnovou délku zvukového vlnění o frekvenci 20 kHz ve vzduchu:

$$\lambda = \frac{331,82}{20\,000} \text{ m} = 0,0166 \text{ m} = 1,66 \text{ cm} \quad (101).$$

V kapalinách a pevných látkách se zvuk šíří rychleji.

Pro následující experiment byl zvolen zdroj zvuku 18 kHz. Tomu odpovídá vlnová délka zvuku ve vzduchu 2.8 cm.

Pro demonstraci lze využít například záznamu autora W. Ruecknera [67] doplněného o komentář učitele. Demonstrace zviditelnění zvukového vlnění:

<https://www.youtube.com/watch?v=MBPh410Gnes>

Ve videu jsou zviditelněné zvukové vlny, které se jeví jako zastavené v prostoru díky efektu stroboskopu. 1 min 45 s - 4 min 5 s. Lze pozorovat vlnovou délku zvukového vlnění ve vzduchu, je demonstrováno přímé měření vlnové délky zvuku a názorně předveden vliv stroboskopového efektu na vizuální dojem (postup vlny od zdroje a ke zdroji). 4 min 05 s - 4 min 32 s demonstrován odraz zvuku na pevné překážce. 4 min 32 s - 4 min 58 s demonstrován ohyb na rovinné překážce, (šíření zvuku v oblasti geometrického stínu).

Pro demonstraci lze využít například záznamu autora W. Ruecknera [68] doplněného o komentář učitele. Demonstrace ohybu na hraně a stojatého vlnění:

<https://www.youtube.com/watch?v=VrgyKFBPQW4>

0 min 40 s - 1 min 15 s demonstrován ohyb na rovinné překážce, (šíření zvuku v oblasti geometrického stínu). Následují ukázk k rozšiřujícímu učivu stojatí vlnění. 1 min 20 s - 1 min 38 s ukázka stabilního stojatého vlnění podélné vlny. 2 min 28 s - 2 min 55 s ukázka změření polohy uzlů a kmiten při stojatém podélné vlny (frekvence stroboskopu byla zdvojnásobena), žákům je vhodné zdůraznit, že vzájemná poloha sousedních uzlů nebo sousedních kmiten je polovinou vlnové délky vlnění, jak bylo probráno v předchozích kapitolách.

Následovat může zápis a rekapitulace probraného učiva, kontrola dosažení výukových cílů a zhodnocení výukové jednotky.

Didaktické poznámky: Zvažuje-li učitel zařazení takto koncipované výukové jednotky pak základním problémem učiva je velmi vysoká míra abstrakce a značná nepřesnost běžně používaných příměrů (obvykle se zvukové vlnění připodobňuje k vlnám na hladině, se kterými žáci mají přímou zkušenost, ale tento model není vhodný zejména proto, že vlny na hladině jsou kombinací podélného a příčného vlnění, a proto jsou jejich projevy odlišné. To je řešeno demonstračními video experimenty zobrazujícími zvukové vlnění. Zobrazování zvuku je poměrně náročné a vyžaduje precizně seřízenou aparaturu i specifické technické prostředky, viz kapitola 6.7.3. V případě reálného provedení, by bylo možné přímo měřit vlnovou délku vybraných tónů, nebo demonstrovat šíření zvuku v různých prostředích a jeho pohlcování. Z důvodu velmi vysoké náročnosti provedení takového měření na úrovni 2. stupně základní školy i s ohledem na vysoké nároky kladené na učitele během výkladu a současného provádění experimentu, nelze prezenční provedení experimentu během vyučovací jednotky doporučit. Experiment má zejména zlepšit představu o povaze zvuku, názorně demonstrovat podélné vlnění, jeho odraz a ohyb i vytvoření stojatého vlnění. K tomuto účelu je vhodné využít materiálu uznávaného odborníka na zobrazování zvukových vln W. Ruecknera [14], [67], [68].

Druhé video zobrazující stojaté vlnění je vhodné zařadit, pokud se učitel rozhodl probrat rozšiřující učivo stojaté vlnění a téma bylo probráno na příkladu příčné vlny, kde je intuitivnější vyvození závislosti mezi vzájemnou polohou sousedních uzlů a sousedních kmiten a jejich vztah k vlnové délce.

8.5.2.2 Přenos tepla

Zařazení: Střední školy a gymnázia Termodynamika - > přenos tepla

Cíle vztahující se k experimentu: Žák vlastními slovy popíše přenos tepla vedením, prouděním a zářením; žák interpretuje rozdíl mezi zobrazením schlierovou metodou zviditelňující projevy přenosu tepla prouděním a zobrazení termokamerou citlivou na tepelné záření těles; žák zlepšuje povědomí o tom, že podstatou přenosu tepla zářením je vyzařování a pohlcování infračervené oblasti spektra; žák správně manipuluje s pojmy elektromagnetické záření, viditelné spektrum, infračervená oblast spektra, tepelný pohyb, tepelné proudění v tekutinách

Didaktické zaměření hodiny - expozice nebo fixace poznatků o přenosu tepla a motivace studentů ke studiu problematiky. Lze užít jako nástroj diagnostiky dosažení výukových cílů tematického celku přenos tepla v případě zařazení experimentu ve fixační fázi hodiny a využití heuristického přístupu.

Využití didaktických pomůcek schlierových metod zobrazení a zobrazení termokamerou:

- Opakování - přenos tepla vedením, prouděním a zářením, pokus bude proveden jako demonstrační, reálný, kvalitativní, motivační v motivační fázi hodiny;
- úvod do problematiky tepelné výměny a popisu existence tří mechanismů tepelné výměny, přičemž pokus bude proveden jako demonstrační, reálný, kvalitativní, motivační v motivační fázi hodiny;
- v hodině zaměřené na kontrolu dosažení výukových cílů v diagnostické fázi, je vhodné zvolit provedení experimentu jako heuristický, demonstrační, reálný, kvalitativní a vyhodnotíme jej metodou rozhovoru se žáky.

Forma hodiny - v případě heuristického pojetí možná diskuze ve skupinách.

Úvod: je vhodné použít sestavu využívající sférické zrcadlo a prostorový břit. Experiment je možné provést prezenčně, z časových i technických důvodů je však lepší vytvořit záznam experimentu a ten následně žákům vhodně prezentovat. Popis sestavy schlierového zobrazení je vhodné provést zevrubně, zejména popsat části sestavy a krátce shrnout jejich funkci.

Pomůcky: termokamera, sestava pro zobrazování schlierovských objektů. Termokamerou můžeme pozorovat tepelné záření pevných těles, schlierovou metodou zobrazování lze zviditelnit zahřívání a proudění vzduchu v okolí těles.

Provedení (zjednodušený popis): Schlierovou zobrazovací metodou je pozorováno zahřívání kovové tyče plamenem. Stejná situace je pozorována také termokamerou. Pozornost žáků je nutno soustředit na zvětšující se zahřátou oblast kovové tyče i zahřívání vzduchu v okolí tyče. Nutno zdůraznit rozdíl mezi pozorováním schlierovou metodou zobrazení a termokamerou. Dochází k ohřevu vzduchu v okolí plamene na vysokou teplotu. Na termokameře je plamen tmavý, z toho lze usoudit, že tepelné záření bude mít pouze malý vliv, dominantní bude přenos tepla prouděním horkého vzduchu nad plamenem. Zahřátý vzduch je jen málo patrný na záznamu termokamery, ačkoli je jeho teplota vyšší než teplota tyče. Dobře je pozorovatelný zahřátý vzduch při zobrazení schlierovým zobrazením. Je dobře vidět, jak zahřátý vzduch stoupá a obtéká tyč. Na termokameře je dobře pozorovatelné zahřívání tyče v místě kontaktu s horkým vzduchem a distribuce tepla tyčí vedením. Takto provedeným experimentem velmi názorně na jednom příkladu demonstrujeme a popíšeme způsoby vedení tepla. Pro větší aktivizační dopad, je v případě experimentů prezenčně prováděných během vyučovací jednotky, možné žáky vyzvat, aby pozorovali teplo proudící od své ruky, nebo předmětu, jehož teplotu změří termokamerou.

Závěr: žáci budou konfrontováni se způsoby přenosu tepla, pozorují přenos zářením pomocí termokamery, prouděním na příkladu pohybu zahřátého vzduchu v okolí tyče a plamene i vedením na příkladu zahřívající se tepelně vodivé tyče.

Didaktické poznámky: obsah a pojetí vyučovací jednotky je nutno uzpůsobit věku žáků i zaměření vzdělávací instituce. Experiment ze záznamu by svou délkou neměl přesáhnout 2 minuty. Vhodnou formou ověření dosažení cílů je rozhovor. Je nutné experiment velmi pečlivě a současně jednoduše komentovat. Je možné zmínit změnu hustoty tekutiny při zahřívání a změnu vnitřní energie prací a tepelnou výměnou, které jsou obvykle probírány později.

Úskalí metody - méně zkušení žáci mohou mít problém s pochopením principu a rozdílu obou použitých metod. **Řešení** - lze se omezit na zdroje zářící i ve viditelném spektru. V případě zobrazení termokamerou, kdy světlo i teplo šířené radiací má stejnou fyzikální podstatu (elmag vlna), jen teplo není neozbrojeným okem pozorovatelné (použití svíčky jako tepelného zdroje).

Poznámka: mezioborově některá zvířata infračervené záření vnímat mohou. Schlierova zobrazovací metoda nám zviditelňuje proudění vzduchu. V takto schématickém výkladu neuvádíme vliv rozdílné teploty na index lomu, ani možnosti měření teploty analýzou záznamů měření v případě měření s kvantifikačním potenciálem. Vždy je vhodné zmínit pojmy laminární a turbulentní proudění, jejich ukázky na prováděném schlierovém zobrazení a zevrubnou charakteristiku (30s-1 min) Tento kvalitativní, frontálně-demonstrační experiment se hodí především do motivační a expoziční fáze výuky. Experiment byl ověřen provedením v kapitole 6.2.2.4.4. a obdobný experiment byl proveden v kapitole 6.2.1.4.9 na sestavě s fázovým filtrem.

8.5.2.3 Měření namáhání průhledného materiálu

Zařazení: Vysoká škola Experimenty s využitím schlierových metod zobrazení - >Měření namáhání průhledného materiálu.

Cíle vztahující se k experimentu: žák vizualizuje projevy namáhání profilu plexiskla; žák si zopakuje zákonitosti dvousvazkové interference a polarizace; žák laboruje na sestavě s Wollastonovými hranoly a využívá schlierové zobrazovací metody s fázovým nebo polarizačním filtrem.

Didaktické zaměření hodiny: aplikace poznatků po předchozím teoretickém studiu namáhání tuhého tělesa.

Využití didaktické pomůcky - sestavy pro schlierové zobrazení fázovým filtrem:

- Aplikace problematiky namáhání materiálu tlakem, experiment bude proveden jako žákovský, nebo demonstrační, reálný, kvalitativní, ověřovací v aplikační fázi výuky;
- Aplikace problematiky vlastnosti Wollastonova hranolu, interference a difrakce demonstrováných na příkladu namáhání materiálu tlakem, lze realizovat jako žákovský, reálný, kvalitativní, ověřovací v aplikační fázi výuky;

Forma hodiny - samostatná práce, práce ve dvojicích či trojicích, nebo demonstrační měření.

Úvod: Analýza napětí a namáhání je komplikovanou úlohou zejména pro vysoké školy technického zaměření. Pro studium reálné distribuce napětí při namáhání těles různých tvarů je se obvykle využívá pouze simulací, které vychází z matematického popisu situace. Schlierová metoda umožní prezentovat problematiku měřením na modelu. Validovat numerický model a jeho závěry je pak možné pozorováním. Je nutné použít sestavu s homogenním polem kolineárních svazků v detekční oblasti, jak je popsána v kapitolách 6.8.2 - *chod paprsků v detekční oblasti* na straně 35, a dále v kapitolách 6.8.4.2 a 6.8.5.1, eventuálně 6.8.5.5, a to vždy v kombinaci s fázovým filtrem 6.5 včetně podkapitol, nebo polarizačním filtrem 6.6 včetně podkapitol. Experiment je možné provést i na realizované sestavě uvedené v kapitole 7.2 a jejích podkapitolách, což bylo prokázáno praktickým provedením měření uvedených v 7.2.4.5 a 7.2.4.7. Vhodným materiálem pro vytvoření namáhaných předmětů je plexisklo. Jedná se o materiál s výhodnými optickými vlastnostmi, snadno dostupný, dobře obrobitelný s

nízkou hodnotou Youngova modulu pružnosti v tahu je přibližně $E = 0,33 \cdot 10^{10}$ Pa i v torzi $G = 0,35 \cdot 10^{10}$ Pa. V případě zaměření hodiny na zkoumání vlastností Wollastonova hranolu je vhodné zaměřit činnost žáků především na precizní justáž sestavy.

Pomůcky: Plexisklo, svěrák nebo jiný nástroj s kleštinami vhodný pro užití v detekční oblasti, sestava s fázovým nebo prostorovým filtrem pro zobrazení projevů indukovaných schlierovským objektem - namáhaným plexisklem. Plexisklo (deska vhodného rozměru a tvaru), momentový klíč pro určení sil působících na schlierovský objekt, lineární polarizátor.

Zadání: Pozoruj projevy působení tlaku na průhledný materiál.

Popis činnosti: Student provede justáž sestavy pomocí objektu s rovnými hranami a pravým úhlem tak, aby výsledný obraz zachovával věrně zobrazované úhly i hrany. V případě zaměření na studium činnosti Wollastonova hranolu ověří polarizační stavy svazků pomocí lineárního polarizátoru. Připravený objekt upevní do kleštin a utáhne momentovým klíčem na stanovenou hodnotu tlaku. Takto připravený schlierovský objekt uloží do detekčního prostoru a pozoruje jeho projevy. Výsledky zaznamená. Pozoruje změny výsledku při zaclonění ordinerního a extraordinerního svazku, a také po vložení lineárního polarizátoru cesty svazku v různých místech sestavy, výsledky zaznamená a komentuje.

Závěr: Student pozoruje pomocí schlierové metody zobrazení distribuce napětí v materiálu při namáhání tlakem. V případě zaměření na studium činnosti Wollastonova hranolu popíše chod ordinerního a extraordinerního svazku vyjádří se k interferenčním a difrakčním jevům v sestavě a popíše změny polarizačních stavů paprsků procházejících sestavou.

Didaktické poznámky: Dosažení výukových cílů je možno ověřit rozhovorem. Je vhodné připravit pro experiment sadu objektů vyřezaných z plexiskla, reprezentující objekty, které jsou často předmětem výpočtů, jako hák jeřábu, válečkové ložisko a podobně. Úskalím je nutnost nepoškodit povrch materiálu, protože plexisklo je snadné poškrábat a při obrábění se štípe a láme. Defekty by měly na pozorování zásadní negativní vliv. K opracování jsou vhodné stroje s vysokými otáčkami a nástrojem na obrábění plastů. Stanovení Youngova modulu pružnosti v tahu nedestruktivní metodou pomocí schlierových metod zobrazení je možné provést i kvantitativně, ale náročnost výpočtů by patrně přesahovala rámec běžného studia. Stanovení Youngova modulu pružnosti v torzi by byl netriviálním problémem a předpokládalo by patrně velmi specifický tvar zkoumaného objektu.

8.6 Praktické zařazení experimentu do výuky

Do výuky byl reálně zařazen demonstrační experiment “přenos tepla zářením a prouděním”. Experiment byl demonstrován žákům tercie osmiletého gymnázia, během online výuky.

8.6.1 Přenos tepla zářením a prouděním

Provedení (zjednodušený popis): Jako zdroj tepla uijeme svíčku nebo žárovku. Tepelný zdroj umístíme přesně mezi dva terčíky stejné plochy a různé odrazivosti (jeden černý a druhý bílý/stříbrný). Vzdálenost terčíků od tepelného zdroje by neměla překročit cca 5 cm (v závislosti na výkonu zdroje). Nejprve lze pozorovat proudění teplého vzduchu od tepelného zdroje. Po krátkém čase lze pozorovat i tepelné proudění vzduchu, stoupajícího od černého terčíku. Pokud přestane tepelný zdroj působit, krátkodobě se projeví jen tepelné proudění nad černým terčíkem.

8.6.1.1 Zařazení experimentu do výuky

Zařazení: 2. stupeň základních škol a nižší gymnázia-> Termodynamika -> přenos tepla hodina - opakování přenos tepla vedením, prouděním a zářením, opakování, kalorimetrická rovnice.

Cíle vztahující se k experimentu: Žák vlastními slovy popíše přenos tepla vedením, prouděním a zářením; žák zvnitřňuje povědomí o tom, že podstatou přenosu tepla zářením je vyzařování a pohlcování infračervené oblasti spektra.

Forma hodiny - online výuka

Didaktické zaměření hodiny - fixace poznatků o přenosu tepla a diagnostika dosažení výukových cílů tematického celku změny vnitřní energie, přenos tepla a kalorimetrická rovnice, souhrnné opakování.

Úvod: je vhodné použít sestavu využívající sférické zrcadlo a prostorový břit. Experiment je vhodnější prezentovat ze záznamu, v případě online výuky není prezenční provedení ani možné. Žáci nemají znalosti z oblasti geometrické optiky a popis sestavy by mohl být pro některé žáky komplikovaný. Je také vhodné použít co nejnázornější měření.

Experiment zařazen jako metoda (prostředek) názorně demonstrační; induktivně deduktivní; upevňovací a prohlubující učivo. Experiment proveden jako demonstrační; reálný - formou videozáznamu o délce 2 min; kvalitativní; motivační a verifikační, užít v úvodu hodiny v průběhu motivace žáků.

Formulace problému: je poměrně náročné demonstrovat přenos tepla prouděním a zářením. Náročné je i uvědomit si, že tepelné záření má obdobné vlastnosti jako viditelné světlo. V následujícím experimentu bude demonstrován přenos tepla prouděním i zářením a bude provedeno srovnání účinnosti pohlcení tepelného záření povrchem dvou hliníkových terčíků, shodných rozměrů, přičemž jeden má povrch nabarven na černo a druhý nikoli.

Objasnění experimentu: Jsou speciální optické metody, které umožní zobrazit proudění vzduchu v prostoru. Experiment se skládá z žárovky umístěné přesně mezi dvěma terčíky, které se liší pouze tím, že jeden je nabarvený na černo a druhý má lesklý povrch, jako zrcadlo. Po sepnutí žárovky bude po chvíli patrné, že ze žárovky stoupá vzduch zahřátý povrchem žárovky, je však zřejmé, že tento teplý vzduch neovlivňuje ani jeden z terčíků. Během experimentu se jeden z terčíků zahřeje a teplý vzduch bude viditelně stoupat také v jeho okolí. Pro názornou demonstraci, že sestava zobrazuje stoupající teplý vzduch, je během experimentu vložena do zorného pole ruka a je možno pozorovat turbulentní proudění vzduchu kolem ruky.

Soustředění pozornosti na projevy experimentu: z důvodu přehlednosti zařazeno v části *Průběh experimentu* v kapitole 8.6.1.2 na straně (102)

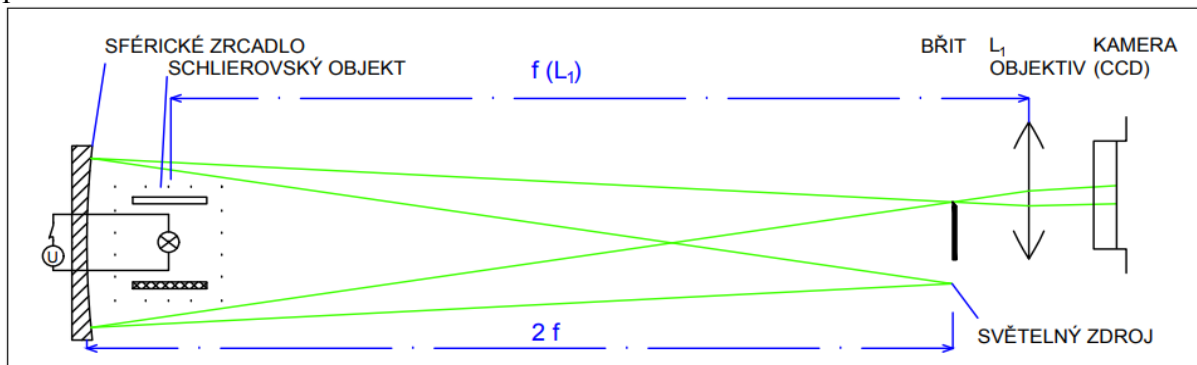
Analýza pozorování a správného pochopení žáky: Zda byly jevy pozorovány a žáky správně pochopeny, bylo ověřeno kladením otázek po experimentu. Dále proběhla diskuze o dotazech, které žáci vznesli v rámci evaluace i v rámci diskuze úvodem hodiny následující.

Shrnutí a vyslovení závěru: K tepelné výměně může docházet zářením. Žárovka byla zdrojem tepelného záření. Množství tepla pohlceného zářením závisí na povrchové úpravě (zejména odrazivosti barvy). Načerněný terčík pohltil více tepelného záření než terčík nenačerněný. Teplejší tělesa zahřívají okolní vzduch a ve vzduchu dojde k tepelné výměně prouděním. Zahřátý vzduch o nižší měrné hustotě stoupá a je nahrazován vzduchem chladnějším.

Didaktické poznámky: Experiment by svou délkou neměl přesáhnout 2 minuty a dobu potřebnou pro zahřátí terčíku je vhodné překonat stříhem. Je nutné experiment velmi pečlivě a současně jednoduše komentovat. Lepší kontrolu nad zdrojem máme, použijeme-li žárovku. Její zobrazování je jednodušší a výkon můžeme regulovat nastavením zdroje. Kvalita záznamu je zhoršena kompresí, použitým programem na stříh videa, což je nutno zohlednit při přípravě na hodinu a zejména ve fázi soustředění pozornosti na průběh experimentu a projevy přenosu tepla prouděním. Je proto vhodné prezentovat experiment v programu interaktivní tabule, který učitelé poskytuje nástroje pro malování. Tento demonstrační experiment se hodí především do motivační a expoziční fáze výuky.

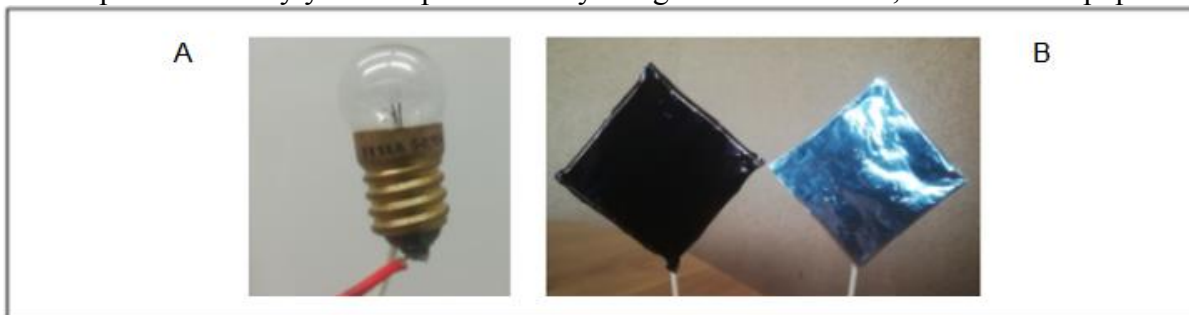
8.6.1.2 Průběh experimentu a schéma zapojení

Znázornění sestavy obr. 118. Žákům nebylo předvedeno s ohledem na jejich věk a úroveň poznání.



Obr. 118. - Schématické zobrazení sestavy pro demonstraci projevů přenosů tepla Schlierovský objekt - přípravek se žárovkou a hliníkovými terčičky zobrazený na obr. 119; f - ohnisko sférického zrcadla ($2f = 2500 \text{ mm}$); $f(L_1)$ - ohnisko objektivu kamery ($f(L_1) = 2300 \text{ mm}$)

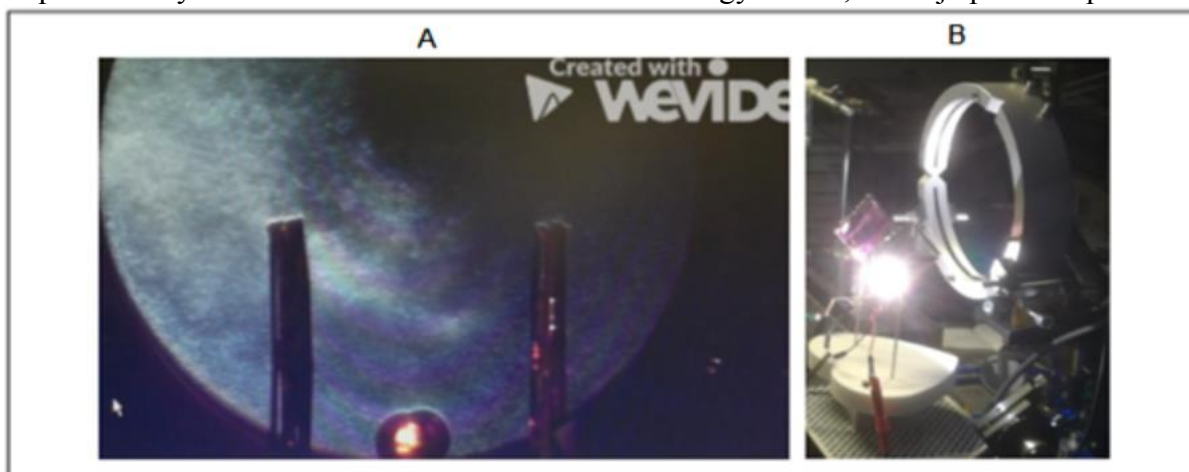
Před expozicí videa byly žákům prezentovány fotografie obr. 119 - A, B se slovním popisem.



Obr. 119. - Příprava experimentu

A - žárovka použitá v experimentu jako zdroj tepelného záření; B - Připravené "terčičky".

Experiment byl demonstrován žákům tercie osmiletého gymnázia, video je přílohou práce.



Obr. 120. - Průběh experimentu zařazeného do výuky.

A - Snímek z vygenerovaného videa, B - Fotografie situace při měření.

Podmínky: Sestříhaný videozáznam zkracuje původních 15 minut experimentu na 2,14 minuty. Experiment začíná sepnutím elektrického zdroje žárovky, již je konstantně po dobu experimentu dodáván proud 2 A při napětí 10 V. Teplota vzduchu při experimentu byla 28 °C.

Průběh experimentu: po připojení elektrického zdroje žárovky začne stoupat proud teplého vzduchu od světelného zdroje (44 s). Učitel má prostor pro soustředění pozornosti žáků. Zopakování, že budou pozorovány projevy vedení tepla ve vzduchu a zdůraznění, že teplý vzduch stoupající ze žárovky neovlivňuje přímo terčíky. Je také vhodné žáky upozornit, že do detekčního prostoru bude vložena ruka pro demonstraci tepelného proudění od ruky a správné funkce zobrazování tepelného proudění v celém detekčním prostoru. Poté, v čase 0 min 44 s je do záběru vložena ruka, z níž stoupá turbulentně teplý vzduch přenášející teplo z ruky prouděním. (10 s). V čase 0 min 54 s nastane nenápadný stříh (do času cca 8 minut od začátku experimentu). Již je patrné, že se černý terčík vlevo zahřívá více než stříbrný terčík vpravo, což je demonstrováno ve videu teplejším vzduchem laminárně proudícím od štítu. Laminární proudění místy přejde v lépe viditelné proudění turbulentní. Tyto jevy v okolí terčíku, včetně rozdílů proti pozorování na začátku experimentu, jako existence „kanálu“ zahřátého vzduchu v prostoru mezi tmavým terčíkem vlevo a žárovkou, i místy viditelný stoupající teplý vzduch na odvrácené straně černého terčíku a skutečnost že u druhého terčíku tyto jevy nepozorujeme (v takové míře), je nutno žákům zdůraznit. Je vhodné při prezentaci používat aplikaci pro interaktivní tabuli a tyto jevy jemně naznačit tenkými čarami (30 s). V čase 1 min 17 s nastane stříh (do 13,5 minuta experimentu). Turbulentní proudění kolem černého štítu je již častější a více patrné. V čase 1 min 37 s nastane vypnutí žárovky (14 minuta experimentu). Teplý vzduch z ní zjevně stoupá ještě 15 s a z černého štítu 20 s. Fáze v záznamu trvá (35 s) **Závěr:** Teplo se na terčíky muselo přenést zářením, protože evidentně nebyly v kontaktu s horkým vzduchem stoupajícím od žárovky. Množství tepla, které těleso absorbuje, závisí na jeho barvě (odrazivosti), protože černý i stříbrný štítek jsou ve všech ostatních ohledech identické (hliníková fólie 8 μm , 5 cm^2) a stříbrný štítek po dobu experimentu nejevil ani známky toho, že by se stal zdrojem tepla pro přenos tepla prouděním ve vzduchu.

8.6.1.3 Evaluace experimentu studenty a zhodnocení zařazení ve výuce

Žáci byli požádáni, aby po hodině dobrovolně a anonymně zodpověděli krátký dotazník a výsledky zaslali formou emailu. Pro vytvoření a hodnocení bylo užito postupů a metod, jak je uvádějí J. Hendl a J. Remr [33]. Bylo použito metody škálování pomocí schématických diferenciálů.

Oznámkuj tvrzení 1-5 1=plně souhlasím, 5=zcela nesouhlasím:

1. Experiment mi pomohl lépe porozumět způsobům přenosu tepla.
2. Experiment byl dobře pochopitelný a srozumitelný „pochopil(a) jsem přenos tepla lépe než podle obrázků v učebnici“.
3. Experiment byl názorný.
4. Experiment by byl pochopitelný a srozumitelný i bez výkladu učitele.
5. Dění v experimentu bylo dobře pozorovatelné (kvalita provedení, kvalita videa).

Doplň vlastní slovní hodnocení experimentu.

Evaluaci provedlo 6 žáků z 20. (hodnocení tvrzení 1-6). Výsledky:

Žák	Hodnocení 1	Hodnocení 2	Hodnocení 3	Hodnocení 4	Hodnocení 5
1	3	3	2	3	3
2	1	1	2	4	2
3	1	3	1	3	2
4	1	2	1	3	3
5	2	4	3	4	4
6	5	3	2	3	4
Průměr	2,17	2,67	1,83	3,33	3,00

Obr. 121. - Tabulka evaluace experimentu studenty

Hodnocení 1-6 koresponduje s výše uvedenými otázkami ve schodném pořadí a se shodným číslováním.

Vlastní slovní hodnocení experimentu studenty (doplňující informace)

- Video se mi líbilo, zajímalo by mě, ale z čeho jsou vyrobeny ty destičky?
- Video bylo naučné a zábavné, pokud by ste ale nemluvil, nepochopila bych to.
- Je pro mě lepší takové věci ukazovat na experimentech pro lepší pochopení.
- Snadněji jsem to pochopil z vašeho videa než třeba z učebnice, bylo to zajímavé, děkuji.
- Ja se chci zeptat, kolik vydává žárovka světla a kolik tepla?
- Mě by zajímalo, proč kamna nesvítilí, když hřejí? Děkuju.

Otázky studentů byly v diskuzi zodpovězeny.

8.6.2 Zhodnocení zařazení experimentu do výuky

Vzhledem k nízkému počtu studentů, kteří se dobrovolně zúčastnili evaluace, mají závěry poměrně nízkou validitu a lze vycházet pouze ze subjektivního hodnocení. Experiment měl motivační efekt a byl přijat pozitivně. Studenti velmi pozitivně vnímali zejména názornost experimentu a subjektivně jej zhodnotili jako prospěšný pro lepší pochopení problematiky. Pokud by experiment nebyl doplněn výkladem učitele a vedením pozornosti žáků, byla by srozumitelnost experimentu nízká. Nedostatečná byla také kvalita prezentovaného záznamu, což bylo způsobeno konverzí formátů. Z důvodu lepší pozorovatelnosti by bylo vhodnější použít některou z barevných metod schlierového zobrazení, nebo zrcadlo s delší ohniskovou vzdáleností. Cíle kladené na využití experimentu ve výuce byly splněny.

8.7 Didaktické zhodnocení práce

Zaměřím se především na sestavu využívající Wollastonových hranolů a založené na interferenci. Práci na tomto typu schlierového zobrazení bych doporučoval pro žáky vysokých škol, především se zaměřením na optiku.

8.7.1 Přímý didaktický přínos použité aparatury s Wollastonovým hranolem

Pro konstrukci a praktické použití sestavy s schlierovým fázovým filtrem hranolu, popsané v kapitole 6.5.6.1 na stranách 29 a 30, je nezbytné pochopení významu polarizace světla, základů krystaloptiky jednoosých dvojlomných hranolů, zejména Wollastonova, dostatečné zvládnutí zákonitostí jevů interference a difrakce. Pro pochopení funkce aparatury je důležité porozumět jevu disperze indexu lomu a uvědomit si rozdíl mezi zobrazením schlierovou zobrazující aparaturou a střížným interferometrem. Pro zobrazování se využívá kamera s detektorem Foveon X3, přičemž meze zobrazení určuje Nyquistův - Shannonův vzorkovací

teorém. Z uvedeného plyne, že student by před studiem vybrané problematiky pomocí této sestavy měl absolvovat základy oboru geometrické i vlnové optiky a teorii elektromagnetického pole. Nyquistův- Shannonův vzorkovací teorém souvisí s nastavením vhodného úhlu svazku dopadajících na kameru. Didakticky je užitečná i metodika vyhodnocení a určení citlivosti použité schlierovské sestavy.

8.7.2 Volba vhodné aparatury pro výuku

Experiment obsahující Toeplerovu schlierovou sestavu s jednou čočkou (6.8.4.1 na straně 38) a metodou temného pole (6.4.5 na straně 18) doporučuje například Fuka a Lepil [28] k demonstraci ohybových jevů na hranách předmětu a k pozorování nehomogenit indexu lomu směsi vody a cukerného roztoku. Před přípravou podobného experimentu musí každý učitel zvážit časové možnosti před hodinou i technické prostředky, které má k dispozici. Sestava byla zvolena pro svou jednoduchost a její citlivost je poměrně malá. Vyžaduje spojnu čočku o ohniskové vzdálenosti alespoň 2 m a celková délka sestavy jistě přesáhne 4 m. Justáž takové sestavy je velmi náročná a správné umístění vhodné clony na optimální pozici trvá přibližně 30 minut. Pro demonstraci tohoto typu je lépe volit Toeplerovu sestavu se dvěma čočkami (6.8.4.2 na straně 39), pokud má učitel k dispozici optickou lavici o délce alespoň 2 m. Vhodná ohnisková vzdálenost výstupní čočky je delší, než 75 cm. Jako schlierový filtr je vhodné volit břit, nebo vhodnou clonu, přičemž clona je sice názornější, ale její umístění je komplikované a prakticky se nikdy neobejde bez xy posuvu, kterým se jemně doladí pozice. Pro pozorování tepelných jevů, difuze, proudění a obtékání těles, nebo vizualizaci zvuku je lepší použít sestavu založenou se sférickým zrcadlem (6.8.5.2 na straně 40), nebo v ideálním případě Z sestavu (6.8.5.1 na stranách 39, 40). Je nutno podotknout, že Z-sestava nebyla součástí praktické realizace této práce a hodnocení vychází ze studia dostupné literatury. Nicméně zrcadla použitelná pro schlierové sestavy (sférická či parabolická) jsou dnes pro školská zařízení poměrně cenově dostupná, mají vysokou kvalitu provedení a můžeme s nimi dosáhnout velkého detekčního pole v porovnání s čočkami. Zrcadla pro teleskopy jsou vhodná i pro schlierové zobrazovací techniky. Sestava se zrcadlem má výhodnější rozměr zorného pole. Justování sestavy se zrcadlem, jako celku je náročné, je nutno dbát na dobré uchycení zrcadla, správné směřování, polohu zdroje i precizní umístění schlierového filtru (například břitu). Je nezbytná také dobrá kázeň a součinnost žáků, protože všechny sestavy jsou vysoce citlivé na otřesy. Jako schlierový filtr je vhodné volit pro experimenty prováděné na základní a střední škole prostorový filtr. Vhodný je břit (6.4.3 na straně 17), nebo některá varianta barevných metod (6.4.6 na stranách 20 - 22). Sestavy, využívající fázového filtru, jsou variantami využívajícími interferenci a informace o objektu je obsažena v interferenčním obrazci. Tyto metody vyžadují vyšší úroveň abstrakce, znalosti v oblasti vlnové optiky a proto nejsou příliš vhodné pro prezentaci žákům základních a středních škol. Jsou naopak velmi vhodné pro kvalitativní i kvantitativní měření s využitím zpracování záznamu digitální technikou a mohou proto být s výhodou zařazeny do prakticky orientované výuky na vysoké škole.

8.8 Dílčí závěr - didaktické zhodnocení práce a metodika

Na úrovni základní školy mají schlierové metody zobrazení potenciál předcházet vzniku a fixaci mylných představ o dějích, jejichž pochopení vyžaduje vysokou míru abstrakce, jako zvukové vlnění nebo přenosy tepla. Pro tento stupeň vzdělávání není vhodné užití realizované sestavy s diferenciálním filtrem. Užití sestavy s prostorovým filtrem a sférickým zrcadlem je vhodné pro reálný kvalitativní experiment. Experiment je vhodnější provádět ze záznamu. Přímé provádění experimentu je spojeno s pořizovacími náklady na pomůcky, časově náročnou justáží, náchylností sestavy na otřesy a s velkými požadavky na prostor. Prezentace schlierového

zobrazení touto metodou klade také vysoké nároky na didaktickou přípravu učitele, který musí velmi dobře komentovat experiment a důsledně soustředit pozornost žáků na děje a jevy v experimentu, které mohou být pro některé žáky méně zřetelné. Je také nutné velmi podrobně analyzovat průběh experimentu a jeho správné pochopení žáky. Jako objekt pozorování je vhodný plamen v kombinaci s tepelným vodičem pro pozorování projevů vedení tepla v okolí tepelného vodiče (8.5.2.2 na straně 98), nebo žárovka v kombinaci s “terčíky” různé barvy, pro demonstraci šíření tepla zářením (8.6 na stranách 100-103). Pro lepší pochopení zvukového vlnění a jeho vlastností je velmi vhodná vizualizace zvuku, která je však velmi technicky náročná a v zájmu názornosti je vhodné zvolit raději video dostupné online od uznávaných odborníků na vizualizaci zvuku schlierovou metodou. Tento přístup byl zvolen také v kapitole (8.5.2.1 na stranách 96-98) Je velmi vhodné doplnit zobrazování tepelných dějů schlierovou metodou o měření pomocí termokamery. Samostatné použití termokamery nezachytí procesy a děje v okolí povrchů těles, nebo plamene, což je předmětem zobrazení schlierovou metodou zobrazení. Využití schlierových metod je pro žáky na základních školách zajímavé, názorné a motivační.

Na úrovni středních škol je vhodné použití aparatury se sférickým zrcadlem. Jednoduchý princip této metody je možné žákům objasnit užitím geometrické optiky. Pokud navíc má škola vhodně vybavenou laboratoř, bylo by možné žákům měření přímo demonstrovat, zejména v semináři fyziky. Vyhodnocení a interpretace výsledků je poměrně náročné. Na střední škole by schlierové zobrazení mohlo pomoci prohlubovat povědomí o podstatě zvuku a stojatého vlnění, nebo přenosu tepla zářením, vedením a prouděním. Pro studium laminárního proudění je vhodné použít jako objekt plamen svíčky. Ten má výraznou laminární i turbulentní oblast a obě oblasti jsou na zobrazení velmi dobře patrné.

Realizovaná sestava s fázovým břítem by byla na střední škole vhodná pro prezentování difrakce, nebo studium chování tuhého tělesa. Vzhledem k velmi náročné justáži a pořizovacím nákladům použitých prvků ji však nelze doporučit.

Studenti vysokých škol mohou s výhodou využívat obě realizované sestavy, a to jako doplněk přednášek a cvičení formou demonstračního experimentu, tak k vlastnímu měření, nebo jako součást laboratorních úloh. Velmi vhodnou variantou by mohla být laboratorní úloha nad rámec běžné výuky, protože (zejména v případě metod s fázovým a diferenciálním filtrem) se jedná o metodu užívanou v technické praxi, nebo jako princip zlepšení kvality zobrazení mikroskopu a teleskopu.

9 Závěr

Práce je zaměřena na studium schlierových metod zobrazení. Je členěna do tří celků, části teoretického popisu schlierových metod zobrazení, části praktické shrnující měření na dvou schlierových sestavách a jejich kvalitativní vyhodnocení a části didaktické zaměřené na možnosti užití schlierových metod v procesu výuky na základních středních a vysokých školách.

V teoretické části byly popsány funkce schlierových metod i schlierovských objektů/schlier - šlír. Práce klade důraz na vytvoření celkového přehledu běžných sestav a způsobů získávání schlierového zobrazení. Byly předloženy způsoby použití schlierových metod i výhody a nevýhody použití jednotlivých sestav a jejich součástí. Podrobně byly rozpracovány zejména možnosti schlierového zobrazení prostorovým filtrem - břítem a fázovým filtrem s využitím Wollastonova hranolu a popsány požadavky na realizaci laboratorní realizaci, protože byly použity pro realizaci praktické části.

V praktické části byly popsány dvě vybrané sestavy (sestava s fázovým filtrem a sestava se sférickým zrcadlem a prostorovým břítem) a jejich praktické využití na vybraných příkladech, na nichž byla ověřena funkčnost sestav v laboratorních podmínkách. Dosažené výsledky a zkušenosti při realizaci byly následně porovnány.

V didaktické části byl proveden úvod do problematiky didaktické analýzy učiva a navržena metodika pro použití schlierových metod na základní, střední a vysoké škole. V reálné výuce byl prezentován experiment doplňující učivo přenos tepla zářením, vedením a prouděním v podobě videozáznamu reálného experimentu.

10 Reference

- [1]: BAJER, J. *Optika I*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2015, 280 s. ISBN 978-80-244-4532-8.
- [2]: BARTUŠKA, K. a SVOBODA E. *Fyzika pro gymnázia: molekulová fyzika a termika*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2004. ISBN 80-7196-200-7
- [3]: BATHEL, B. F. a kol. *Two-point, parallel beam focused laser differential interferometry with a Nomarski prism*. Applied Optics. 2020, 59(2). Dostupné z: doi:10.1364/AO.59 000244
- [4]: BEATY, W. *Making sound visible.Schlieren Photography*. [online] Bill Beaty. Dec. 1999. [cit 3. 5. 2017]. Dostupné z: <http://amasci.com/amateur/seesnd.html>
- [5]: BEDNARÍK, M. a ŠIROKÁ M. *Fyzika pro gymnázia: mechanika*. 3. přeprac. vyd. Praha: Prometheus, 2003. ISBN 80-7196-176-0.
- [6]: BEDNARÍK, M. *Vybrané kapitoly z didaktiky fyziky pro OU a UŠ*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 1974, 91 s.
- [7]: BISS, M. M., SETTLES, G. S., STAYMATES M. E. a SANDERSON, S. R. *Differential schlieren-interferometry with a simple adjustable Wollaston-like prism*. Applied Optics. 2008, 3 (47), 328-335. ISSN 0003-6935
- [8]: BLAŽEJ, J. The measurement of a transverse profile of laser beam by Knife Edge method [online]. Praha: ČVUT Praha, 2013 [cit. 2021-6-26].
- [9]: BORN, M. a WOLF, E. Principles of Optics, Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light. 7. vyd. Oxford: Cambridge University Press, 1999. ISBN 9781139644181.
- [10]: BOUCHAL, Z. Optika (část I). Učební pomůcka pro studenty oborů Matematika-Fyzika, Fyzika-Výpočetní technika, Fyzika-Chemie, Optika a optoelektronika, Biofyzika, Aplikovaná fyzika. [online]. Univerzita Palackého v Olomouci [2007]. [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: http://optics.upol.cz/userfiles/file/OPT_PO_CAST_I.pdf
- [11]: BOUCHAL, Z. Řešené úlohy k přednáškám Optika anizotropních prostředí (OPT/ANIZ), optika krystalů (OPT/OK). Řešení úloh pomocí programů OSLO Premium fy Lambda Research. Učební texty. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2009.
- [12]: BOUCHAL, Z. *Svazková optika. Učební pomůcka pro studenty oboru Přístrojová optika*. [online] Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2009. [cit. 3. 5. 2017]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/44224872-Svazkova-optika-zdenek-bouchal-ucebni-pomucka-pro-studenty-oboru-pristrojova-optika-2-rocnik-1-h-pr-1-h-cv-tydne.html>
- [13]: CERUZZI, A. CADOU, CH. P. Turbulent Air Jet Investigation using Focused Laser Differential Interferometry. In. 53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 10.-12. 7. 2017, Atlanta. American Institute of Aeronautics and Astronautics 2017, 4834. ISBN 978-1-62410-511-1.
- [14]: CROCKETT, A. a RUECKNER, W. *Visualizing sound waves with schlieren optics*. American Journal of Physics [online]. 2018, 86(11), 870-876 [cit. 2021-6-13]. ISSN 0002-9505. Dostupné z: doi:10.1119/1.5042245
- [15]: ČERVENKA, M. *Laboratorní cvičení z fyziky. Návod k laboratorním úlohám. Stanovení Youngova modulu pružnosti v tahu přímou metodou*. [online]FEL-ČVUT, Katedra fyziky. [cit. 25. 5. 2021]. Dostupné z <https://planck.fel.cvut.cz/praktikum/downloads/navody/young.pdf>
- [16]: DAVID, J. a CHEEKE, N. *Fundamentals and applications of ultrasonic waves*. 1. vyd. London, New York. CRC PRESS 2002, 446 s. ISBN 0-8493-0130-0
- [17]: DEBRUS, S., FRANCON, M., GROVER, C. P., MAY, M. a ROBLIN, M. L. *Ground Glass Differential Interferometer*. Applied Optics. 1972, 4(11), 853-857. ISSN 0003-6935.
- [18]: DESSE, J. M. a DERON, R. *Shadow,Schlieren and Color Interferometry*. Journal Aerospace Lab. 2009, 1, 1-10. ISSN: 2107-6596

- [19]: DESSE, J. M. a OLCHEWSKY, F. *Digital Holographic Interferometry for Analysing High-Density Gradients in Fluid Mechanics*. In: NAYDENOVA, I., NAZAROVA, D. a BABEVA, T. (ed.). *Holographic Materials and Optical Systems*. IntechOpen 2017, No 13. eBook (PDF) ISBN: 978-953-51-5792-2
- [20]: DESSE, J. M. a OLCHEWSKY, F. *Dual-reference digital holographic interferometry for analyzing high-density gradients in fluid mechanics*. *Optics Letters*. Lille Cedex, 2018, 43(8), 1635-1638. ISSN 0146-9592
- [21]: DESSE, J. M. *Recent contributions in color interferometry and applications to high-speed flows*. *Optics and laser in engineering* 2006, 44, 304-320. ISSN 01438166
- [22]: DORRIO B. V. a FERNANDEZ, J. L. *Phase-evaluation methods in whole-field optical measurements techniques*. *Meas. Sci. Technol.* 1999, 10(3) R33-R55. ISSN 0957-0233.
- [23]: DOSTÁL, J. *Učební pomůcky a zásada názornosti*. 1. vyd. Olomouc: VOTOBIA, 2008, 40 s. ISBN 978-80-7409-003-5
- [24]: EDMONDS, W. D. *The reflection, a new reflective optical element, and some application*. *Applied Optics*. 1973, 8, 12, 1940-1945. ISSN 0003-6935
- [25]: FIXLER, D., HAMOOTAL, D., ANKRI, R. a ZALEVSKY, Z. *Determination of coherence length in biological tissues*. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2011, 43(4), 339-343. ISSN 01968092.
- [26]: FRANC, J. *Fyzika III - Optika. Kapitola 6 - Difrakce*. [online] Fyzikální ústav UK, Odd. optoelektroniky a magnetooptiky. [cit. 25. 5. 2021]. Dostupné z: http://fu.mff.cuni.cz/semicond/media/files/courses/kapitola-6-difrakce-text-18-12-19_AASpJEm.pdf
- [27]: FUKA, J., BEDNAŘÍK, M. a LEPIL, O. *Didaktika fyziky*. Vyd. 1. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 1981, 323 s.
- [28]: FUKA, J. a LEPIL, O. *Konkrétní didaktika fyziky - II. část - B*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 1972, 139 s.
- [29]: GLOGE, D. *Weakly Guiding Fibers*, *Appl. Opt.* 1971, 10, 10, 2252-2258. ISSN 0003-6935.
- [30]: GOJANI, A. B., KAMISHI, B. a OBAYASHI, S. *Measurement sensitivity and resolution for background oriented schlieren during image recording*. *Journal of Visualization*, 2013, 16(3), 201-207. ISSN 1343-8875.
- [31]: HARGATHER, M. J., SETTLES, G. S., a MADALIS, M. J. *Schlieren Imaging of loud sounds and weak shock waves in air near the limit of visibility*. *Shock Waves (Nice)*, 2010, 20, 9-17. ISSN 0938-1287
- [32]: HAVELKA, B. *Zobrazení na podkladě paprskové optiky*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1966.
- [33]: HENDL, J. a REMR, J. *Metody výzkumu a evaluace*. Praha: Portál, 2017. ISBN 978-80-262-1192-1.
- [34]: HOLUBOVÁ, R. *Aktuální problémy výuky fyziky na střední škole*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2011, 91 s. Studijní texty. ISBN 978-80-244-2740-9
- [35]: HOLUBOVÁ, R. *Didaktika fyziky: studijní modul*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012, 93 s. ISBN 978-80-244-3296-0.
- [36]: HOOKE, R. *Micrographia: or, Some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glasses. With observations and inquiries thereupon*. London: [J. Martyn](#) and J. Allestry, 1665, 256 s.
- [37]: HORSKÝ, J. *Kvantová mechanika*. 1. vyd. Brno: Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Brně, 1978, 96 s.
- [38]: HOSCH, J.W. a WALTERS J.P. *High spatial resolution schlieren photography*. *Applied Optics*. 1977, 16(2).

- [39]: HOWARD, A. a kol. Implementation of a Wollaston interferometry diagnostic on OMEGA EP. San Diego, 2018.
- [40]: HOWES, W. L. *Rainbow schlieren and its applications*. App. Optics, 1984, 23(14), 2449-2460. ISSN 0003-6935-
- [41]: HUGENSCHMIDT, M. *Lasermesstechnik: Diagnostik der Kurzzeitphysik*. Institut Hochfrequenztechnik und Quantenelektronik, Universität Karlsruhe: Springer Berlin, Heidelberg, 2007. 222 s. ISBN 978-3-540-29921-9.
- [42]: HYZER, W. G. *Role of the eye in high-speed motion analysis*. Proceedings Volume 2869, 22nd International Congress on High-Speed Photography and Photonics, (Santa Fe 1996). Engineering, Computer Science 1997, 38-43.
- [43]: JACKSON, D. P., CHANG, M-H. *Acoustic levitation and the acoustic radiation force*. American Journal of Physics, 2021, 89(4), 383-392. ISSN 0002-9505.
- [44]: KALHOUS, Z., OBST, O. a kol. *Školní didaktika*. Vyd. 2, Praha: Portál, 447 s. ISBN 978-80-7367-571-4
- [45]: KARU, T. I., LETOKHOV, V. S., LOBKO, V. V., NOVIKOV, V. F. a PARAMONOV, L. V. *Phototherapy of gastric and duodenal peptic ulcer patients based on cell stimulation with low-intensity red light*. Voprosy. Kurortologii Fizioterapii. i lečebnoj. fizičeskoj Kultury (Moscow), 1984 (1), Jan-Feb. 36-39. ISSN: 0042-8787.
- [46]: KARU, T. I. *Light Coherence: Is this Property Important for Photomedicine*. Photobiological sciences, Photomedicine. ISSN 2470-2749. [online]. American society for photobiology 6. 4. 2011. [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <http://photobiology.info/Coherence.html>
- [47]: KOMRSKA, J. *Difrakce. kap. 5 Fresnelovy ohybové jevy*. [online], VÚT v Brně, Ústav fyzikálního inženýrství. [cit. 25. 5. 2021]. Dostupné z: <http://physics.fme.vutbr.cz/~komrska/Difrakce/KapD05.pdf>.
- [48]: KREYSING, M. a kol. Dynamic operation of optical fibres beyond the single-mode regime facilitates the orientation of biological cells. Nat. Commun. 2014, 5, No.5481. ISSN 2041-1723 (online)
- [49]: KUMAR, R. Interference and diffraction effects in folding mirror schlieren diffraction interferometer. Applied physics B, 2008, 93(2-3), 415-420. ISSN 0946-2171.
- [50]: KUMAR, R. a kol. Phase knife-edge laser Schlieren diffraction interferometry with boundary diffraction wave theory. Pramana: Journal of physics [online]. Indian Academy of Sciences, 2007, 68(4) [cit. 2021-6-26].
- [51]: LAW, C. K. a SUNG, C. J. *Structure, aerodynamics, and geometry of premixed flamelets*. Progress in Energy and Combustion Science 2000, 26(4):459-505. ISSN 03601285
- [52]: LAWSON, J. M., NEET, M. C., GROSSMAN, I. J. a AUSTIN. J. M. *Static and dynamic characterization of focused laser differential interferometer*. Experimental in fluids 2020, 61 (8), artical 187. ISSN 0723-4864
- [53]: LEPIL, O. *Fyzika pro gymnázia: mechanické kmitání a vlnění*. 3. přeprac. vyd. Praha: Prometheus, 2003. ISBN 80-7196-216-3.
- [54]: LEPIL, O. *Fyzika pro gymnázia: optika*. 3. přeprac. vyd. Praha: Prometheus, 2004. ISBN 80-7196-237-6.
- [55]: LEPIL, O. *Vybrané kapitoly k modulu didaktika fyziky*. 1. vyd. Olomouc: Universita Palackého 2012, 45 s. ISBN 978-80-244-3297-7
- [56]: LEPTUCH, P. A. a AGRAWAL, A. K. High-speed rainbow schlieren visualization of an oscillating helium jet undergoing gravitational change. Journal of Visualization 2006, 9(1), 101-109. ISSN 1343-8875.
- [57]: LOPEZ. C. A. Numerical simulations of schlieren system from the Fourier optics perspective. In.: 25th Plasmadynamics and Lasers Conference, 20. 6. - 23. 6. 1994 Colorado Springs. AIAA 1994.

- [58]: MACH, E. a SALEHER, P. *Photographische Fixirung der durch Projectile in der Luft eingeleiteten Vorgänge*. Sitzber. d. k. Akad. d. Wiss. Wien, 1887, 95 (Bd. II), s. 764-780.
- [59]: NIJHOFF, M. *ŒUVRES COMPLETES CHRISTIAAN HUYGENS: CORRESPONDANCE 1664—1665*. SOCIETE HOLLANDAISE DES SCIENCES, 1893, 625 s. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.5962/bhl.title.21031>
- [60]: OBST, O. *Obecná didaktika. 1. vyd.* Olomouc: Universita Palackého v Olomouci, Pedagogická fakulta 2016, 176 s. ISBN 978-80-244-4916-6.
- [61]: OBST, O. *Řízení výuky. 1. vyd.* Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2011
- [62]: PASCHOTTA, R. *LP Modes*. [online]. RP Photonics Encyklopedia. [cit. 25. 5. 2021]. Dostupné z https://www.rp-photonics.com/lp_modes.html
- [63]: PETTY, G. *Moderní vyučování*. Vyd. 2. Praha: Portál, 2002. ISBN 80-7178-681-0.
- [64]: POLANSKÝ, D. *Koherence laserového svazku v turbulentní atmosféře*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [65]: PRAST, G. *Quantitative measurements by the Schlieren method*. Phillips Tech. Rev. 1987, 43(7), 184-191.
- [66]: RAMBOUSEK, V. a kol. *Technické výukové prostředky*. Praha: SPN, 1989, 302 s.
- [67]: RUECKNER, W. *Visualizing Ultrasound with Schlieren Optics Part I - YouTube*. YouTube [online]. Copyright © 2021 Google LLC [cit. 13.06.2021]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=MBPh410Gnes>
- [68]: RUECKNER, W. *Visualizing Ultrasound with Schlieren Optics Part II - YouTube*. YouTube [online]. Copyright © 2021 Google LLC [cit. 13.06.2021]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=VrgyKFBPQW4>
- [69]: ROY, V., PARÉ, C., LAPERLE, P., DESBIENS, L. a TAILLON, Y. *Yb-doped large mode area fibers with depressed clad and dopant confinement*. In: Proceedings Volume 9728, Fiber Lasers XIII: Technology, Systems, and Applications, (5 April 2016), ed. J. Ballato, 97281W, 7 s.
- [70]: RUBINOV, A.N. a AFANAS'EV, A. A. *Nonresonance mechanisms of biological effects of coherent and incoherent light*. Optics and Spectrosc. (2005), 98, 943-948. ISSN 0030-400X.
- [71]: RYS, S. *Příprava učitele na vyučování*. 1. vyd. Praha: SPN 1979, 115 s.
- [72]: SEQUENS, J. *Technika zobrazení fyzikálních polí*. 15. 1. Praha: Československá akademie věd, 1980, 160 s. 509-21-827.
- [73]: SETTLES, G. S. *Schlieren and Shadowgraph Imaging in the Great Outdoors*. In: Proceedings of PSFVIP-2 May 16-19, 1999, Honolulu, USA, PF302. Berlin: Springer, 2001. ISBN 3-540-66155-7.
- [74]: SETTLES, G. S. *Schlieren and Shadowgraph Techniques*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2001. ISBN 978-3-642-63034-7
- [75]: SLAVÍK, M. a kol. *VYSOKOŠKOLSKÁ PEDAGOGIKA Pro odborné vzdělávání*. Praha: Grada Publishing, 2012. ISBN 978-80-262-1192-1.
- [76]: SMEETS, G. a GEORGE, A. *Dual Exposure Interferometry*. Report ISL-39-72. 1982, 1982 (NASA 3542), 20. N83-21262, NASA-TM-77002.
- [77]: SMEETS, G. a GEORGE, A. *Laser-Differential Interferometer Application in Gas Dynamics*. Report 28/73 Sant-Louis 7. Nov. 1973, (přeložil Andreas R. Goetz - School of Aeronautics and Astronautics Purdue University West Lafayette 12. 3. 1996) 66 s.
- [78]: SMITH, W. J. *Modern optical engineering*. 4. vyd. New York: McGraw-Hill Profesional, 2000, 768 s. ISBN: 9780819470966
- [79]: SOROKO, L. M. *Dirac delta plus (or minus) function in optics and mesooptics*. Sov. Phys. Usp., Submitted to Uspekhi Fizicheskikh Nauk. Institute for nuclear reserch (1987) E13-87-292.
- [80]: SOROKO, L. M. *Holography and Coherent Optics*. Dubna: Joint Institute for Nuclear Research Dubna, USSR, 1980. ISBN 0-30640101-0

- [81]: SOROKO, L. M. *MESO-OPTICS, Foundations and Applications*. London. World Scientific Publishing Copyright, 1996, 428 pp. ISBN 981-02-2700-0
- [82]: STEVENSON, D. *Quantitative Colour Schlieren Techniques*. Johannesburg, A dissertation submitted to the Faculty of Engineering and the Built Environment, University of the Witwatersrand 2011
- [83]: SVOBODA, E. a KOLÁŘOVÁ, R. *Didaktika fyziky základní a střední školy: vybrané kapitoly*. Praha: Karolinum, 2006, 232 s. ISBN 80-246-1181-3.
- [84]: ŠŤASTNÝ, M. a PEKÁREK, K. *Flow Visualization in a Steam Turbine Profile Cascade Using a Colour Schlieren Method*. In. Sborník IUTAM symposium Liblice 1984, Škoda Plzeň. Heidelberg: Springer Berlin, 1985
- [85]: TOEPLER, A. Ueber die Methode der Schlierenbeobachtung als mikroskopisches Hilfsmittel, nebst Bemerkungen zur Theorie der schiefen Beleuchtung. *Ann. Phys.*, 1866, 4, 203, 556-580.
- [86]: TREVIÑO-PALACIOS, C. G., ITURBE-CASTILLO, M. D., SÁNCHEZ - de - la - LLAVE, D. a OLIVOS-PÉREZ, L. I. Nonlinear Imaging Applied to the Visualization of Flow Patterns. In. *Proceedings of SPIE Vol. 6046, Fifth Symposium Optic in Industry*, 9. Dec. 2005, Santiago de Queretro, Mexico, 2006, s. 602427.
- [87]: TROPEA, C., YARIN, A. L. a FOSS, J. F. *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics*. 2007. Berlin Heidelberg: Springer 2007, 1156 s. ISBN 978-3-540-25141-5.
- [88]: URUBA, V. *Optické metody využívající změny hustoty média*. [online]. Ústav termomechaniky AV ČR. [cit. 25. 5. 2021]. Dostupné z: <http://www2.it.cas.cz/~uruba/docs/ZIE/hustota.pdf>
- [89]: VÁLOVÁ, P. *Přednáška 3-1. Speciální mikroskopické metody*. [online]. Univerzita Palackého v Olomouci. 2018 [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: https://www.prf.upol.cz/fileadmin/userdata/PrF/katedry/kbb/Dokumenty/Materialy_k_vyuce/mik_3-1_Specialni_mikroskopicke_metody_2018.pdf
- [90]: VASILEV L. A. *Schlieren method*. Jerusalem: Israel program, New York, 1971, (transl. A. Baruch).
- [91]: VEČEŘA, V. *Optické vláknové děliče*. Olomouc, 2015. Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci
- [92]: VISHAL, S. a kol. Full-field Hilbert phase microscopy using nearly common-path low coherence off-axis interferometry for quantitative imaging of biological cells. *Journal of Optics*, 2012, 14(12), 125707. ISSN 2040-8978.
- [93]: VÖLKER-POP, L. M. *Optical methods in rheology: polarized light imagin*. *Chem. listy*. 2014, 108 (7), Bulletin, 45 (3), 697-724. ISSN 1213-7103 (on-line). [cit. 2021-6-13]. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2014_07_707-710.pdf
- [94]: VYBÍRAL, B. *Experiment ve fyzice*. Matematika - fyzika - informatika, 2011, 21, číslo 2. ISSN 1805-7705.
- [95]: VYŠÍN, I. a ŘÍHA, J. *Paprsková a vlnová optika*. 1. vydání, Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012, 123 s. ISBN 978-80-244-3334-9
- [96]: WEINBERG, F. J. *Optics of flames, including methods for the study of refractive index fields in combustion and aerodynamics*. London: Butterworths, 1963, 251 pp.
- [97]: ZENG, Z., CHIU, H-CH., ZHAO, L., ZHAO, T., ZHANG, CH., KARIMI, M., YU, H., DU, S. a CHEN, X. *Dual beam-shear differential interference microscopy for full-field surface deformation gradient characterization*. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Dec. 2020, vol. 145, ISSN 0022-5096.
- [98]: ZHAI, D., CHEN, S., YIN, Z. a LI, S. Review of self-referenced measurement algorithms: Bridging lateral shearing interferometry and multi-probe error separation. *Front. Mech. Eng.* 2017 12(2), 143-157. ISSN 2095-0233

- [99]: *HVDUO-10M (Technická dokumentace)* [online]. Docplayer 2004. [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <http://docplayer.net/33536441-Hvduo-10m-digital-color-camera-hvduo-10m-digital-color-camera-with-foveon-x3-cmos-color-image-sensor.html>
- [100]: *Manual Fiber Polarization Controllers.Thorlabs (Technická dokumentace)* [online]. Thorlabs 1999. [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=343
- [101]: *Polarizer*. Wikipedia, The Free Encyklopedia, aktualizováno 20. listopadu 2020, 19:13. [cit. 2021-5-23]. Dostupné z <https://en.wikipedia.org/wiki/Polarizer>
- [102]: *Rámcový vzdělávací program pro gymnázia* [online]. Praha: VÚP, 2007 [cit. 2021-06-01]. Dostupné z: <http://www.nuv.cz/file/159>
- [103]: *Rámcový vzdělávací program pro základní vzdělávání* [online]. Praha: MŠMT, 2021 [cit. 2021-06-01]. Dostupné z: <http://www.nuv.cz/file/4983/>
- [104]: *TPS6131x1.5-A Multiple LED Camera Flash and Video Light Driver With I2CCompatible Interface (Technická dokumentace)*. [online]. Texas Instruments, březen 2010, revidováno září 2016. [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/slvs978d/slvs978d.pdf?ts=1612599392178&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [105]: *Wollaston Prisms. Thorlabs (Technická dokumentace)* [online]. Thorlabs 1999. [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=917

11 Seznam obrázků

Obr. 1. - Základní parametry sestavy pro schlierové zobrazení:	5
Obr. 2. - Schlierovský objekt s gradientem indexu lomu ve směru osy x:	7
Obr. 3. - Schlierovský objekt je rotačně symetrický podle osy y.	8
Obr. 4. - Rozložení prvků v sestavě pro schlierové zobrazení Toeplerova typu:	11
Obr. 5. - Dislokace ovlivněných svazků při průchodu rovinou břítu.	12
Obr. 6. - Grafické zhodnocení vlivu zaclonění na citlivost.	13
Obr. 7. - Vliv polohy objektu v detekční oblasti.	14
Obr. 8. - Znázornění Fresnelovy a Fraunhoferovy difrakce za clonou.....	15
Obr. 9. - Difrakce na břítu.	15
Obr. 10. - Relativní intenzita I_r a fázový posun φ při difrakci na hraně.	17
Obr. 11. - Možnosti umístění břítu v ose z zobrazovací sestavy:	17
Obr. 12. - Sestava s vertikálním a horizontálním uložením jednoduchého břítu.	18
Obr. 13. - Zobrazení plynové trisky A - metodou světlého pole, B - metodou temného pole.	18
Obr. 14. - Prostorových filtr realizovaný clonou a štěrbinou - zobrazení světlého pole	19
Obr. 15. - Prostorových filtr realizovaný clonou a štěrbinou - zobrazení temného pole.....	19
Obr. 16. - Znázornění trasování paprsků při použití barevného filtru.	20
Obr. 17. - Světelné zdroje a barevné filtry citlivé na gradient indexu lomu v jednom směru.	21
Obr. 18. - Světelné zdroje a barevné filtry citlivé na gradient indexu lomu ve více směrech.	21
Obr. 19. - Světelné zdroje s barevnou maskou a clony / filtry.	22
Obr. 20. - Prostorový břit a gradientní filtr.	22
Obr. 21. - Zobrazení prostorovým břitem a gradientním filtrem.....	22
Obr. 22. - Sestava s reflexním břitem umístěným v bodu fokusu neovlivněných svazků.....	23
Obr. 23. - Použití dvou rastrů při schlierové metodě orientované na pozadí.	24
Obr. 24. - Vznik fázového rozdílu.....	25
Obr. 25. - Znázornění interference neovlivněných svazků střížného interferometru.	27
Obr. 26. - Sestava s fázovým břitem tvořeným Lloydovým zrcadlem.....	28
Obr. 27. - Znázornění základní sestavy s využitím dvou Wollastonových hranolů.....	29
Obr. 28. - Popis činnosti Wollastonova hranolu.....	29
Obr. 29. - Symbolické znázornění chodu kolimovaných paprsků Wollastonovým hranolem.	30
Obr. 30. - Sestava využívající jednoho Wollastonova hranolu a dvou polarizátorů.	30
Obr. 31. - Sestava využívající tří Wollastonových hranolů a dvou $\lambda/4$ destiček.....	31
Obr. 32. - Základní sestava s využitím dvou polarizátorů.....	32
Obr. 33. - Chod paprsků detekční oblasti.	35
Obr. 34. - Vliv směru gradientu indexu lomu na chod ovlivněných paprsků.	36
Obr. 35. - Znázornění chodu paprsků za schlierovským objektem v sestavě s objektivou.....	37
Obr. 36. - Znázornění chodu paprsků za schlierovským objektem v sestavě se zrcadlem.....	37
Obr. 37. - Toeplerova sestava s jednou spojnou čočkou.	38
Obr. 38. - Toeplerova sestava se dvěma objektivou, nebo čočkami	39
Obr. 39. - Dvouzrcadlová schlierová sestava "Z-typ".	40
Obr. 40. - Jednozrcadlová schlierová sestava "of axis".	40
Obr. 41. - Schéma jednozrcadlové schlierové sestavy s děličem svazku.....	41
Obr. 42. - Sestava "Z - typ" s fázovým "břitem".	41
Obr. 43. - Uložení Wollastonova hranolu vzhledem k fokálním rovinám sestavy.	42
Obr. 44. - Grafické vyjádření vztahu rozměru sestavy s rastrem a její citlivostí.	43
Obr. 45. - Sestava využívající měření na pozadí difrakce	43
Obr. 46. - Sestava se specifickým pozadím a clonou.	44
Obr. 47. - Sestava s reflexním rastrem.	44
Obr. 48. - Schlierové zobrazení teleskopem.....	45

Obr. 49. - Příklad mesooptické sestavy	50
Obr. 50. - Schéma realizované sestavy s fázovým filtrem:	52
Obr. 51. - Znázornění složení a funkce kruhového polarizátoru	53
Obr. 52. - Interference záření ze dvou směrů	54
Obr. 53. - Grafický popis veličin při interferenci	54
Obr. 54. - Znázornění chodu paprsků za schlierovským objektem při využití fázového filtru.....	55
Obr. 55. - Příklad možného vyhodnocení měření na příkladu výřezu obr. 87 na straně 74	56
Obr. 56. - Vyhodnocení intenzity v záznamu pro modrý a zelený kanál fázového filtru.....	56
Obr. 57. - Polarizační stavy LP ₀₁	57
Obr. 58. - Schématické znázornění světelného zdroje polarizovaného světla (módů LP ₀₁) ..	58
Obr. 59. - Fotografie uspořádání světelného zdroje polarizovaného světla (módů LP ₀₁).	59
Obr. 60. - Použitý polarizační kontroler s obecným nastavením rovin.	59
Obr. 61. - Poincarého sféra a její aplikace na při nastavení polarizačního stavu.	60
Obr. 62. - Schéma realizované sestavy s fázovým filtrem	60
Obr. 63. - Celkový pohled na realizovanou sestavu s " fázovým břítem"	61
Obr. 64. - Detail prostoru kolimačního objektivu Wollastonova hranolu a reflexního členu. .	61
Obr. 65. - Detail prostoru fázového filtru reflexního členu 2 a kamery.	62
Obr. 66. - Wollastonův hranol.	62
Obr. 67. - Wollastonův hranol - závislost úhlu odchýlení na vlnové délce.....	63
Obr. 68. - Schéma prvku reflexní člen 1.	63
Obr. 69. - Schéma prvku reflexní člen 2.	64
Obr. 70. - Fotografie použitého polarizátoru C-PL.	64
Obr. 71. - Fotografie použité kamery.	64
Obr. 72. - Princip technologie Foveon X3.....	65
Obr. 73. - Normalizovaná spektrální citlivost červeného, modrého a zeleného senzoru.	65
Obr. 74. - Příklad justáže pomocí referenčního prvku vertikálně.	66
Obr. 75. - Příklad justáže pomocí referenčního prvku horizontálně.	66
Obr. 76. - Barevná kalibrace záznamu záření na pozadí.	66
Obr. 77. - Porovnání záznamů měření pro jednotlivé vlnové délky a jejich kombinaci.	67
Obr. 78. - Zobrazení projevů difrakce.	67
Obr. 79. - Zobrazení projevů zahřívání objektu se zanedbatelným rozměrem v ose z	68
Obr. 80. - Zobrazení projevů v okolí chladného tělesa.	69
Obr. 81. - Zobrazení projevů mísení plynů.	70
Obr. 82. - Zobrazení projevů silového působení na průhledné těleso 1.	71
Obr. 83. - Zobrazení projevů silového působení na průhledné těleso 2.	72
Obr. 84. - Použití zdroje plamene A - hořák; B - svíčka.	72
Obr. 85. - Zobrazení projevů plamene - svíčka.	73
Obr. 86. - Zobrazení projevů plamene - „hořák“ vertikálně.....	74
Obr. 87. - Fotografie plamene hořáku směřovaného horizontálně.	75
Obr. 88. - Zobrazení projevů plamene - „hořák“ horizontálně.....	75
Obr. 89. - Zaznamenaná situace zahřátí okraje kovového objektu.....	76
Obr. 90. - Zaznamenaný vývoj situace po zahřátí kovového objektu 4 cm od okraje.	76
Obr. 91. - Zobrazení projevů v okolí žárovky a plasmové koule.	77
Obr. 92. - Záznam vlivu výboje.....	78
Obr. 93. - Schématické zobrazení schlierové sestavy "of axis" s prostorovým břítem.....	79
Obr. 94. - Schématické zobrazení schlierové sestavy "of axis" s prostorovým břítem.....	80
Obr. 95. - Fotografie sestavy se zrcadlem a prostorovým břítem.....	80
Obr. 96. - Fotografie vícebodového světelného zdroje.	81
Obr. 97. - Fotografie prostorového břítu, objektivu a kamery	81
Obr. 98. - Příklad vad zobrazení před justáží.	82

Obr. 99. - Zobrazení projevů přenosu tepla zářením a vedením vyobrazen.....	82
Obr. 100. - Zobrazení vertikálně směřovaného hořáku.	83
Obr. 101. - Zobrazení vertikálně směřovaného plamene hořáku.	83
Obr. 102. - Zobrazení horizontálně směřovaného plamene hořáku.	83
Obr. 103. - Zobrazení vlivu přípravku pro usměrnění proudu vzduchu z fénu.	84
Obr. 104. - Zobrazení projevů vedení a proudění tepla - kondukce a konvekce tepla.	85
Obr. 105. - Srovnání výsledků měření na příkladu horizontálního měření „hořáku“	86
Obr. 106. - Požadavky na výukové cíle.....	88
Obr. 107. - Didaktické zásady vyučování.....	88
Obr. 108. - Abstrakční kužel a úroveň abstrakce přijímaných informací. Převzato z [23].	89
Obr. 109. - Analýza rozhodování v pedagogické praxi.....	90
Obr. 110. - Sociální formy vyučování.	90
Obr. 111. - Aspekty vyučovacích metod	91
Obr. 112. - Dělení experimentů prováděných ve výuce	92
Obr. 113. - Fáze výuky	93
Obr. 114. - Fáze demonstračního experimentu. Převzato z [27].	93
Obr. 115. - Výpis RVP. ZŠ.....	94
Obr. 116. - Výpis RVP. - GYMNÁZIA.	95
Obr. 117. - Výpis RVP. - GYMNÁZIA.	95
Obr. 118. - Schématické zobrazení sestavy pro demonstraci projevů přenosů tepla	102
Obr. 119. - Příprava experimentu	102
Obr. 120. - Průběh experimentu zařazeného do výuky.	102
Obr. 121. - Tabulka evaluace experimentu studenty	104

12 Seznam příloh

Příloha 1 Videozáznam použitý v kapitole 7.6 (CD)

13 Bibliografická identifikace

Autor: Vladimír Večeřa

Název práce: Schlierová metoda zobrazení

Typ práce: Diplomová

Pracoviště: Katedra experimentální fyziky

Vedoucí práce: RNDr František Petráš.

Rok obhajoby: 2021

Počet stran:

Počet příloh: 1

Jazyk: Český

Klíčová slova: Schlierová metoda, výuka fyziky, Wollastonův hranol, interference, difrakce, prostorový břit, fázový filtr.

14 Bibliographic identification

Autor: Vladimír Večeřa

Title: Schlieren metod

Type of thesis: Diploma thesis

Department: Department of Experimental Physics

Supervisor: RNDr František Petráš.

Year of presentation: 2021

Number of pages: 117

Number of appendices: 1

Language: Czech

Keywords: Schlieren metod, education of physics, Wollaston prism, interference, diffraction, knife edge, phase filter.