



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky**

Optická soustava ovládaná pomocí EAP

The Optical System Operated Using EAP

Diplomová práce

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Studijní obor: Multimediální technika

Vedoucí práce: Ing. Lubor Jirásek, CSc.

Bc. Michal Matějka

Praha 2017

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
katedra radioelektroniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Michal Matějka**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Multimediální technika

Název tématu: **Optická soustava ovládaná pomocí EAP**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Prostudujte odbornou literaturu týkající se optických soustav, čoček a možnosti ovlivnění jejich optických vlastností.
- 2) Na základě 1) navrhnete a realizujete několik typů čočkových soustav ovladatelných pomocí EAP (elektricky ovladatelných umělých svalů). Navažte na výsledky své bakalářské práce. Zaměřte se především na řízení optické mohutnosti čočky/systemu a možnost korekce standardních optických vad pomocí kombinace jednotlivých typů čoček (spojka, rozptylka, s různými indexy n , clona) jak je užíváno např. u fotografických přístrojů.
- 3) Proveďte měření na několika pokusných vzorcích. Pro ověření kvality optických vlastností využijte standardních metod.
- 4) Vyhodnoťte dosažené výsledky.

Seznam odborné literatury:

- [1] Klein, M., V. - Furtak, T., E.: Optics. 2nd edition, John Willey&Sons, 1986. A pozdější reedice, případně německý překlad Springer-Verlag, ISBN 3-540-18911-4, ISBN 0-387-18911-4.
- [2] Husák, M.: Přednášky z předmětu Senzory v elektronice a informatice. ČVUT FEL, Praha 2013.
- [3] Husák, M.: Mikrosenzory a mikroaktuátory. Academia 2008.
- [4] Bar-Cohen, Y.: Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles. Spie Press, Washington 2004.
- [5] Matějka, M.: Bakalářská práce. ČVUT FEL, Praha 2014.

Vedoucí: Ing. Lubor Jirásek, CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017



doc. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 19. 2. 2016

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci „Optická soustava ovládaná pomocí EAP“ zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a používal jsem pouze literaturu uvedenou na konci práce. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Praze dne 9. 1. 2017

Bc. Michal Matějka

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Luboru Jiráskovi CSc. za poskytnutí odborných rad, cenné připomínky, ochotu a trpělivost při vypracování diplomové práce.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá problematikou ovládání optické mohutnosti čoček, zejména kapalinových. Jsou zde uvedeny nejpoužívanější způsoby ovládání optické mohutnosti kapalinových čoček. V praktické části je navrženo a změřeno několik typů kapalinových membránových čoček ovládaných pomocí elektroaktivního polymeru. Jako aktuátor je v této práci použit elektroaktivní polymer dielektrického typu vyrobený z akrylátové pásky VHB 4910.

Klíčová slova: kapalná čočka, membránová čočka, elektroaktivní polymer

Abstrakt

This diploma thesis is about how to control optical power of lenses, especially liquid lenses. There is written how way is possible to control optical power and how principles are most often use to control an optical power of liquid lenses. In practical part is design for several types of liquid lenses. Liquid lenses in this thesis are control by electroactive polymers. As the actuator is in this thesis used dielectric electroactive polymer, which is made from acrylic tape VHB 4910.

Key words: liquid lens, membrane lens, electroactive polymer

1 Obsah

1.	Úvod	7
1.1	Fyzikální podstata optického záření	7
1.2	Druhy světelného záření.....	8
1.3	Šíření světla.....	9
1.4	Index lomu	10
1.5	Odraz a lom světla	12
1.6	Optické zobrazování	13
1.6.1	Zobrazení čočkou.....	14
1.6.2	Zobrazení spojnou čočkou.....	16
1.6.3	Zobrazení rozptylnou čočkou	17
1.6.4	Soustava dvou čoček	18
2	Materiály na výrobu čoček	20
2.1	Skleněné čočky	20
2.2	Plastové čočky	20
2.3	Kapalinové čočky	21
2.3.1	Electrowetting čočky	22
2.3.2	Membránové čočky	23
3	Experiment	26
3.1	Aktuátor.....	26
3.2	Membrána čočky	27
3.3	Kapalina čočky	28
3.4	Optické soustavy.....	30
3.4.1	Membránová čočka přímo řízená EAP	30
3.4.2	Membránová čočka se zásobníkem	39
3.4.3	Soustava spojky a rozptylky.....	46
3.4.4	Odstanění zkreslení.....	48
4	Závěr.....	50
5	Literatura.....	52
6	Přílohy	54
6.1	Měření ESF objektivu Tamron	54
6.2	Měření ESF dvojjvypuklé spojný čočky přímo ovládaný naplněný 6 ml vody	54
6.3	Měření ESF ploskovypuklé spojky se zásobníkem naplněný 6ml solného roztoku	55
6.4	Měření ESF kombinace spojky a rozptylky	55

Seznam použitých zkratek a symbolů

EAP - Electroactive Polymers – Elektroaktivní polymery

ESF - Edge Spread Function – Rozptylová funkce hrany

MTF – Modulation Transfer Function – Modulační přenosová funkce

ROI – Region Of Interest – Oblast zájmu

LW/PH – Line Width per Horizontal – počet čar na výšku obrazu

Cy/Px – Cycles per Pixel- počet cyklů na pixel

a	(cm)	předmětová vzdálenost
a'	(cm)	obrazová vzdálenost
f	(cm)	předmětová ohnisková vzdálenost
f'	(cm)	obrazová ohnisková vzdálenost
F	(cm)	předmětové ohnisko
F'	(cm)	obrazové ohnisko
n	(-)	index lomu
φ	(D)	optická mohutnost
r	(cm)	poloměr křivosti optických ploch
d	(cm)	tloušťka
E	(Vm ⁻¹)	intenzita elektrického pole
H	(Am ⁻¹)	intenzita magnetického pole
ϵ_0	(Fm ⁻¹)	permitivita vakua
ϵ_r	(-)	relativní permitivita
λ	(nm)	vlnová délka
μ	(Hm ⁻¹)	permeabilita prostředí
v	(ms ⁻¹)	rychlost šíření

1. Úvod

Optika je fyzikální obor zabývající se světelným zářením. Pojednává o šíření světla prostředím, lomu a odrazu světla na rozhraních dvou prostředí. Dále optika pojednává o zobrazování jednoduchými optickými prvky, optickými soustavami, viděním a vlastnostech světelného záření.

Optikou se lidstvo zabývá od nepaměti, první názory představovaly světlo ve formě různě velkých hmotných částice, které vyletují ze světelných zdrojů a pohybují se velkou rychlostí prostorem. Velikost částic představovala barvu světla. V roce 1690 přestavil Christiaan Huygens první teorii o tom, že světlo je vlnění, čímž vysvětlil zákonitosti odrazu a lomu světla. Neuvažoval ale tak male vlnové délky, proto nedovedl vysvětlit přímočaré šíření světla a jeho teorie neuspěla. Světlo jakožto elektromagnetické záření je popisováno až po roce 1873, kdy James Clerk Maxwell odvodil teorii elektromagnetického pole a vyslovil předpoklad, že i světlo je elektomagnetické záření. Maxwellovu teorii potvrdil a experimentálně dokázal v roce 1887 Heinrich Rudolf Hertz.

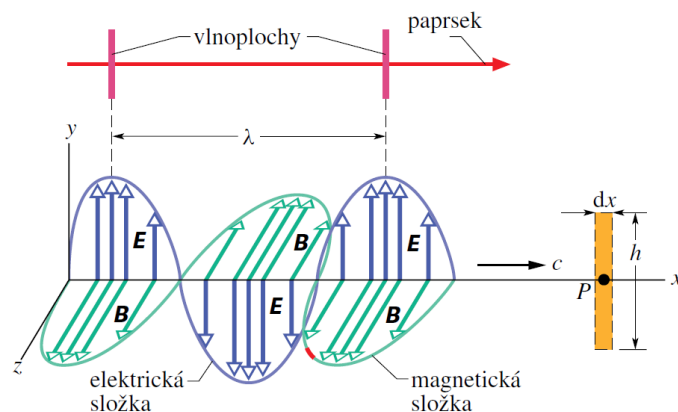
1.1 Fyzikální podstata optického záření

V optice nejčastěji používané je viditelné světlo o vlnové délce λ v rozsahu 380nm až 780nm, které je schopno v lidském oku budit zrakový vjem. Vlnová délka λ je závislá na frekvenci podle vztahu

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

kde c je rychlost světla ve vakuu $c = 299\,792\,458 \text{ ms}^{-1} \doteq 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$. a f je frekvence záření.

Světlo je elektromagnetická vlna, znázorněná na obr. 1, která je složena ze dvou navzájem kolmých složek, a to elektrické, která je popsána vektorem elektrické intenzity \vec{E} , a magnetické složky popsané vektorem magnetické intenzity \vec{H} .



Obr. 1: Elektromagnetická vlna. Převzato z [4]

Elektromagnetickou vlnu lze také popsat pomocí vektoru elektrické indukce \vec{D} a magnetické intenzity \vec{H} . Jelikož

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (2)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3)$$

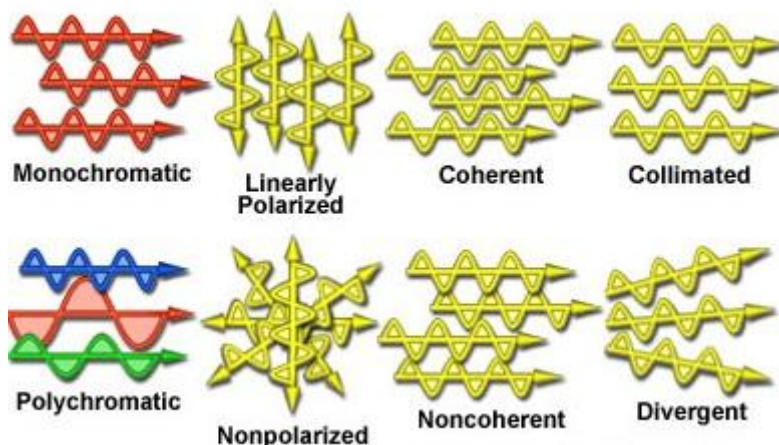
kde ε je permitivita a μ permeabilita prostředí, ve kterém se vlna šíří. Rychlost šíření světla daným prostředím lze získat ze vztahu

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\varepsilon_r\mu_0\mu_r}} \quad (4)$$

kde ε_0 je permitivita vakua $8,854187818 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$, ε_r je permitivita daného prostředí, μ_0 je permeabilita vakua $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$ a μ_r je permeabilita daného prostředí. Po dosazení $\varepsilon_r = 1$ a $\mu_r = 1$ pro vakuum do vztahu (4), získáme výše zmiňovanou tabulkovou rychlost světla ve vakuu $c = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$.

1.2 Druhy světelného záření

Jak již bylo řečeno výše, světlo charakterizuje frekvence, nebo také vlnová délka, která udává barevný vjem. Další základní vlastnosti světelného záření jsou zobrazeny na Obr. 2.



Obr. 2: Druhy světelného záření. Převzato z [6]

Monochromatické světlo je charakteristické tím, že je složeno z vlnění o stejné frekvenci, tedy i stejné vlnové délce a barvě. Čistě monochromatické záření není v přírodě obvyklé, většinou se jedná o světlo, které je složeno z více barev a monochromatické záření se z něho získává použitím filtrů. Typický zdroj monochromatického záření je laser, který se v optice často používá.

Polychromatické světlo je na rozdíl od monochromatického světla složeno ze záření o různých vlnových délkách. Výsledné světlo je složeno z jednotlivých dílčích záření. Typickým příkladem polychromatického světla je bílé denní světlo.

Lineárně polarizované světlo je takové, kde vektor elektrické intenzity \vec{E} kmitá stále v jedné rovině.

Nepolarizované světlo je takové, kde vektor elektrické intenzity \vec{E} stále mění směr, a tedy i rovinu, ve které kmitá.

Koherentní světlo je složeno ze světelných paprsků, které mají stejnou vlnovou délku a stejnou fázi.

Nekoherentní světlo je charakteristické tím, že jednotlivé vlny záření nekmitají ve fázi.

Kolimované světlo je takové světlo, kde jednotlivé paprsky světla se nerozbíhají, šíří se stále rovnoběžně.

Divergentní světlo je takové světlo, kde se jednotlivé paprsky šíří pod různými úhly od zdroje.

1.3 Šíření světla

Prostředí, kterým se světlo šíří lze z hlediska optických vlastností rozdělit na homogenní a nehomogenní.

Homogenní prostředí je takové, jehož parametry nejsou prostorově závislé, a jsou tedy v každém místě prostoru konstantní.

Nehomogenní prostředí je charakteristické tím, že alespoň jeden parametr popisující prostředí, je prostorově závislý.

Další dělení optického prostředí je na izotropní a anizotropní.

Opticky izotropní prostředí je takové, kde rychlost šíření světla nezávisí na směru šíření.

Opticky anizotropní prostředí je naopak takové prostředí, kde rychlost šíření světla závisí na směru šíření. Typickým anizotropním prostředím jsou některé krystaly.

V optice se pro popis šíření světla používá pojem paprsek, což je přímka kolmá na vlnoplochu šíření, která v homogenním optickém prostředí definuje směr šíření světelného záření.

1.4 Index lomu

Absolutní index lomu je definován jako poměr rychlosti světla ve vakuu a v daném materiálu vztahem

$$N = \frac{c}{v} \quad (5)$$

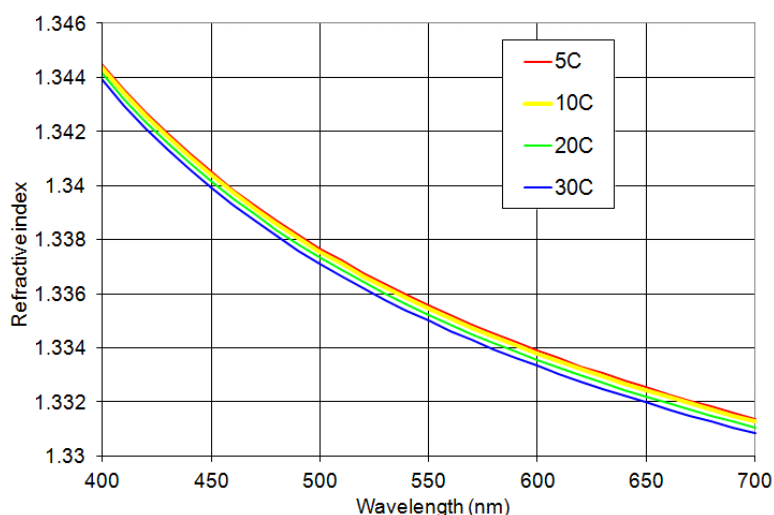
kde c je rychlost světla ve vakuu a v je rychlost šíření v daném materiálu. V optice obvykle pracujeme s nemagnetickými dielektriky, proto v nemagnetickém prostředí pro absolutní index lomu platí

$$N = \sqrt{\varepsilon_r} \quad (6)$$

kde ε_r je relativní permitivita. V optice se také setkáme s relativním indexem lomu, který je definován jako

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} \quad (7)$$

kde v_1 a v_2 jsou rychlosti šíření ve dvou optických prostředích. Index 21 značí, že se jedná o relativní index lomu prostředí 2 vzhledem k prostředí 1.



Obr. 3: Závislost indexu lomu vody na vlnové délce a na teplotě. Převzato z [13]

Index lomu je závislý na frekvenci příslušného světelného záření, proto se v tabulkách uvádí index lomu materiálů pro určité vlnové délky. Závislost indexu lomu na vlnové délce je dobře pozorovatelná při rozkladu bílého světla na hranolu. Další důležitou vlastností indexu lomu dané látky je teplotní závislost, tuto skutečnost dokládá Obr. 3, kde je zobrazena závislost indexu lomu vody nejen na vlnové délce, ale také na teplotě materiálu. Jak je z obrázku patrné, hodnota indexu lomu se zvyšující se vlnovou délkou klesá. Pro teplotní závislost platí, že se zvyšující se teplotou hodnota indexu lomu klesá. V tabulce 1 jsou uvedeny hodnoty indexu lomu materiálů obvykle používaných v optice pro vlnovou délku 589 nm a teplotu 20 °C

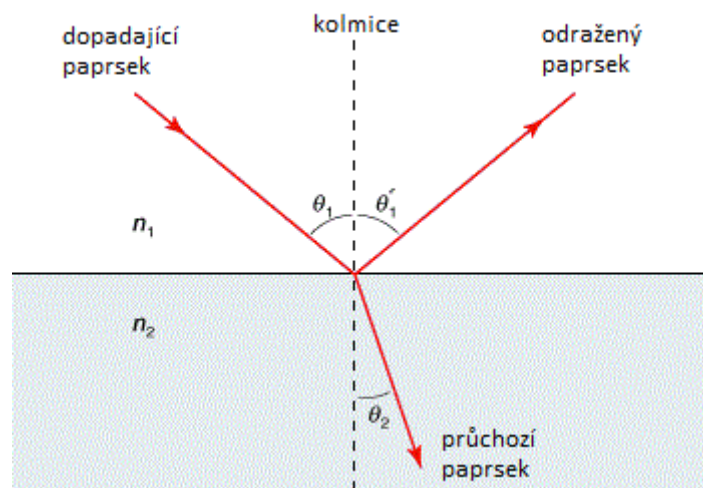
Vzduch	1,000
Vakuum	0,99971
Voda	1,333
Ethanol	1,362
Benzen	1,501
Glycerol	1,469
Silikonový olej	1,520
Kanadský balzám	1,542
Led	1,310
Křemenné sklo	1,459
Flintové sklo	1,752
Kuchyňská sůl	1,544
Diamant	2,417

Tab. 1: Tabulka indexů lomu pro $\lambda=589$ nm při 20 °C. Převzato z [8]

1.5 Odraz a lom světla

Dopadá-li světelný paprsek na rozhraní dvou homogenních izotropních nevodivých prostředí, dojde zde k částečnému odrazu dopadajícího paprsku zpět do původního prostředí a lomu paprsku do druhého prostředí. Tuto situaci znázorňuje Obr. 3. Zde je vidět dopadající paprsek na rozhraní dvou prostředí o různých indexech lomu n_1 a n_2 . V místě dopadu paprsku je znázorněna kolmice k rozhraní, podle které se určují úhly dopadu a odrazu. Úhel mezi kolmicí a dopadajícím paprskem se nazývá úhel dopadu θ_1 a úhel mezi kolmicí a odraženým paprskem se nazývá úhel odrazu θ_1' . Podle zákona odrazu (8) se úhel dopadu rovná úhlu odrazu.

$$\theta_1 = -\theta_1' \quad (8)$$



Obr. 3: Lom a odraz na rovinném rozhraní dvou prostředí.

Šíření průchozího paprsku ve druhém prostředí definuje Snellův zákon (9), neboli zákon lomu.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (9)$$

kde n_1 je index lomu prostředí, ze kterého dopadá paprsek, n_2 je index lomu kam paprsek dopadá, θ_1 je úhel dopadu a θ_2 je úhel, který svírá průchozí paprsek s kolmicí. Dle vztahu (5) můžeme zákon lomu vyjádřit ve formě (10) poměrů rychlostí šíření.

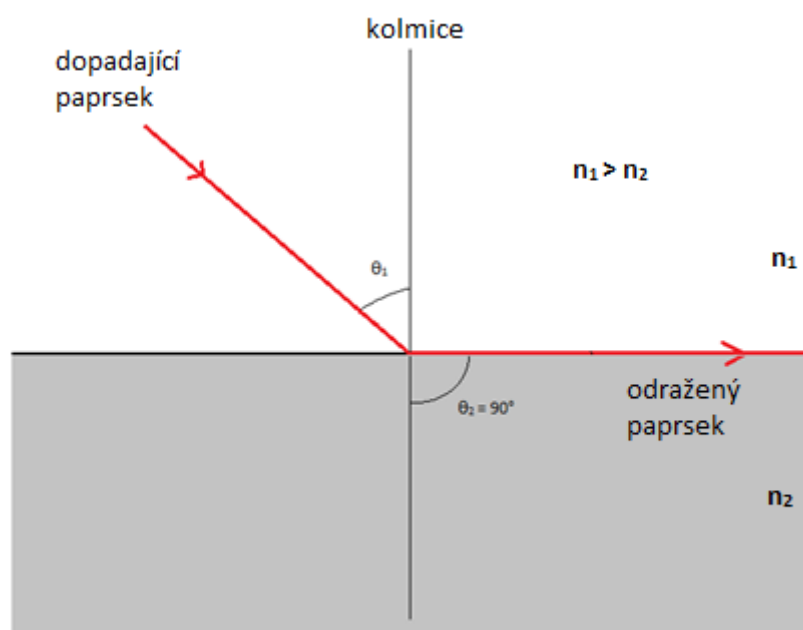
$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (10)$$

Kde n_1 je index lomu prostředí, ze kterého dopadá paprsek, n_2 je index lomu kam paprsek dopadá, θ_1 je úhel dopadu a θ_2 je úhel, který svírá průchozí paprsek s kolmicí, v_1 je rychlost šíření v prostředí dopadu a v_2 je rychlost šíření v druhém prostředí. Ze zákona lomu plyne, že pro při $n_1 < n_2$, respektive

$v_1 > v_2$, tedy při přechodu z opticky řidšího prostředí do opticky hustšího se paprsek láme ke kolmici. Naopak když je $n_1 > n_2$, respektive $v_1 < v_2$, tedy při dopadu z opticky hustšího do opticky řidšího prostředí se paprsek láme od kolmice.

V případě přechodu z opticky hustšího prostředí do opticky řidšího může nastat jev, který se nazývá úplný odraz. Při určitém úhlu dopadu α_M (11), který se nazývá mezním úhlem, dosáhne úhel dopadu právě 90° a paprsek se nelomí do druhého prostředí, ale šíří se podél rozhraní ve formě evanescentní vlny viz Obr. 4.

$$\alpha_M = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (11)$$



Obr. 4: Totální odraz na rozhraní dvou prostředí

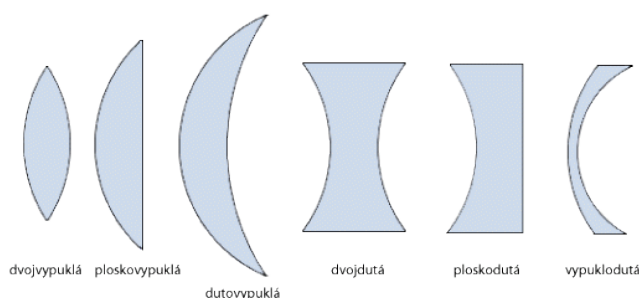
1.6 Optické zobrazování

Optické zobrazení znamená zobrazování předmětů optickou soustavou, které se řídí optickými zákony a vlastnostmi šíření světla popsány v kapitolách výše. Optické zobrazení je založeno na skutečnosti, že světlo se šíří v izotropním prostředí přímočaře, zákonu odrazu, zákonu lomu a na principu nezávislosti světelných paprsků. Nezávislost světelných paprsků znamená, že jednotlivé paprsky se navzájem neovlivňují a šíří prostředím nezávisle na sobě.

Optická soustava se skládá z lámavých a odrazných ploch, které mají za úkol ovlivnit průchod paprsků soustavou. Hlavní úkol optické soustavy je převést obraz z obrazové roviny do roviny předmětové s požadovanými parametry.

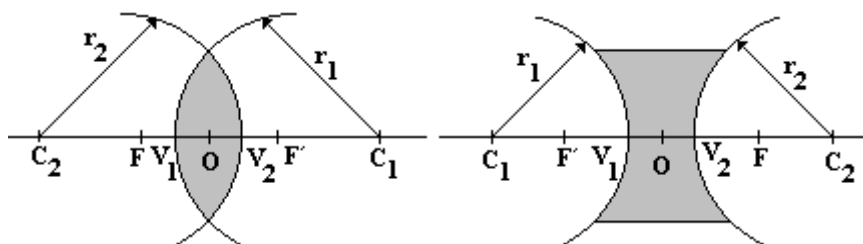
1.6.1 Zobrazení čočkou

Čočka je homogenní průhledný útvar, který se skládá buď ze dvou kulových ploch, nebo z jedné kulové plochy a jedné rovinné. Čočky se rozdělují na spojky, jinak řečeno konvexní čočky, u kterých se při průchodu paprsky spojují, a na rozptylky, jinak řečeno konkávní čočky, u kterých se při průchodu paprsky rozcházejí. Podle tvaru optických ploch lze spojné čočky rozdělit dále na dvojbypuklé, ploskovypuklé a dutovypuklé. Rozptylné čočky se analogicky rozdělují na dvojduté, ploskoduté a vypukloduté. Toto základní rozdělení tvarů je znázorněno na Obr. 5.



Obr. 5: Základní tvary optických čoček Převzato z [14]

Průchod paprsku čočkou se řídí zákonem lomu, který se zde uplatní hned dvakrát. Jeden lom paprsku nastává při vstupu paprsku do čočky, kdy vzhledem ke změně prostředí, a tedy i změně indexu lomu dochází k lomu paprsku. Druhý lom procházejícího paprsku se uskuteční tehdy, když paprsek opouští čočku a přechází do jiného prostředí, nejčastěji do vzduchu.



Obr. 6: Parametry čoček, vpravo spojná a vlevo rozptylná čočka. Převzato z [9]

Průchod paprsku čočkou je ovlivněn jejími parametry, základní parametry jsou vyobrazeny na Obr. 6, kde jsou znázorněny dva hlavní druhy čoček, a to spojná a rozptylná čočka. Vlevo před čočkou se nachází předmětový prostor s předmětovým ohniskem F a vpravo prostor obrazový s obrazovým ohniskem F' . Hlavním parametrem optických čoček je materiál, ze kterého jsou vyrobeny, respektive index lomu daného materiálu. Nejčastěji jsou optické čočky vyrobeny ze skla, indexy lomu nejčastěji používaných skel viz Tabulka 1. Další velmi důležitý parametr, který ovlivňuje zobrazení čočkou je poloměr zakřivení optických ploch, na obrázku vyznačeny r_1 a r_2 . Poloměr zakřivení spolu s indexem

lomu určují, jak se bude paprsek lámat při průchodu čočkou. Parametr, který souvisí s poloměrem zakřivení je střed křivosti optických ploch C_1 a C_2 , které se nacházejí na optické ose. Dalším parametrem jsou vrcholy zakřivení optických ploch značené V_1 a V_2 , které se nacházejí na optické ose a určují tloušťku čočky d jako

$$d = |V_2 - V_1| \quad (12)$$

kde V_1 a V_2 jsou vrcholy optických ploch. Posledním parametrem znázorněným na obrázku je optický střed čočky O . Vzdálenost mezi předmětovým ohniskem F a středem čočky O se nazývá předmětová ohnisková vzdálenost f . Analogicky se vzdálenost mezi obrazovým ohniskem a středem čočky nazývá obrazovou ohniskovou vzdáleností f' a lze ji určit ze vztahu [3]

$$f' = \frac{n_1 n_2 r_1 r_2}{(n_2 - n_1)[d(n_2 - n_1) + n_2(r_2 - r_1)]} \quad (13)$$

kde n_1 je index lomu okolního prostředí, které bývá nejčastěji vzduch, n_2 je index lomu materiálu ze kterého je čočka vyrobena, r_1 a r_2 jsou poloměry křivosti čočky a d je tloušťka čočky. V případě, že tloušťka čočky je zanedbatelná vzhledem k poloměrům křivosti, nazývá se taková čočka tenkou a platí pro ni [3]

$$f' = \frac{n_1 r_1 r_2}{(n_2 - n_1)(r_2 - r_1)} \quad (14)$$

Pokud je před čočkou i za čočkou stejné prostředí pak platí

$$f' = -f \quad (15)$$

Ohniskové vzdálenosti f' a f mají stejnou absolutní hodnotu, liší se jen znaménkem vzhledem k znaménkové konvenci. Ohnisková vzdálenost je hlavní znak, který popisuje čočku, v praxi se pro popis čočky používá termín optická mohutnost, která je definována jako

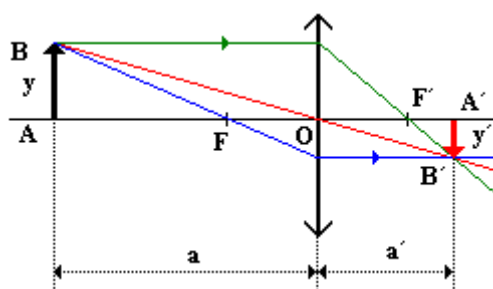
$$\varphi = \frac{1}{f'} \quad (16)$$

Takto vyjádřená optická mohutnost čočky se udává v dioptriích (m^{-1}) [3]. U spojných čoček má optická mohutnost kladné znaménko, naopak u rozptylných čoček má záporné znaménko. Ze vztahu (16) je patrné, že optickou mohutnost 1D má čočka s ohniskovou vzdáleností 1m. Čím větší je zakřivení čočky, tím větší refrakční schopnost čočka má.

1.6.2 Zobrazení spojnou čočkou

Pro zobrazování předmětů spojnou čočkou se využívají tři hlavní význačné paprsky:

- paprsek procházející rovnoběžně s optickou osou, který se láme do obrazového ohniska (zelený paprsek na obrázku č. 7)
- paprsek procházející předmětovým ohniskem, který se láme rovnoběžně s optickou osou (modrý paprsek na obrázku č. 7)
- paprsek procházející optickým středem (červený paprsek na obrázku č. 7)



Obr. 7: Průchod významných paprsků spojnou čočkou. Převzato z [9]

Při zobrazování předmětu spojnou čočkou je důležitá vzdálenost předmětu od středu čočky, tato vzdálenost se nazývá předmětová vzdálenost, na obrázku označena písmenem a . Po průchodu čočkou vzniká obraz v obrazové vzdálenosti a' . Při zobrazování se dodržuje znaménková konvence, která definuje, že paprsky přicházejí zleva, tedy z předmětové oblasti a směřují do obrazové oblasti, a platí tedy:

- a – je kladná před čočkou (vlevo)
- a – je záporná za čočkou (vpravo)
- a' – je kladná za čočkou (vpravo)
- a' – je záporná před čočkou (vlevo)
- pro spojku - $f > 0$
- pro rozptylku - $f < 0$
- je-li $a' > 0$, obraz je skutečný
- je-li $a' < 0$, obraz je neskutečný

Závislost obrazové vzdálenosti na ohniskové vzdálenosti čočky definuje zobrazovací rovnice

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{a'} \quad (17)$$

Dalším parametrem popisujícím transformaci z předmětové oblasti do obrazové oblasti čočky je příčné zvětšení, které je definováno jako poměr velikosti předmětu a obrazu [9]

$$Z = \frac{y'}{y} = -\frac{f}{a-f} \quad (18)$$

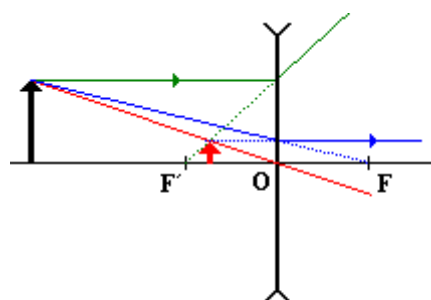
kde y je velikost zobrazovaného předmětu a y' je velikost obrazu. V závislosti na předmětové vzdálenosti mohou nastat při zobrazování spojnou čočkou tyto možnosti obrazu:

- Pokud je a více než dvojnásobek f , pak je obraz převrácený, zmenšený a skutečný
- Pokud je a přesně dvojnásobek f , pak je obraz převrácený, skutečný a stejně velký jako předmět
- Pokud je a větší, než f , ale menší, než dvojnásobek f , pak je obraz přímý, skutečný a zvětšený
- Pokud se předmět nachází v ohnisku, pak je obraz neskutečný, přímý a vzniká v nekonečnu
- Pokud se a nachází mezi optickým středem a f , pak je obraz neskutečný, přímý a zvětšený

1.6.3 Zobrazení rozptylnou čočkou

Pro zobrazování předmětů rozptylnou čočkou se používají tři významné paprsky:

- paprsek rovnoběžný s optickou osou, který se láme tak, že v prodloužení prochází obrazovým ohniskem (zelený paprsek na obrázku č. 8)
- paprsek směřující do obrazového ohniska se láme rovnoběžně s optickou osou (modrý paprsek na obrázku č. 8)
- paprsek procházející optickým středem (červený paprsek na obrázku č. 8)



Obr. 8: Průchod významných paprsků rozptylnou čočkou. Převzato z [9]

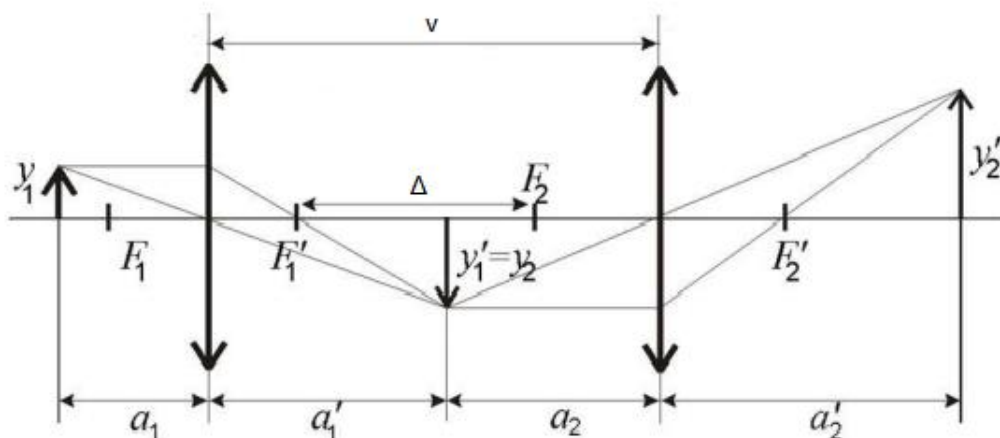
Při zobrazování rozptylnou čočkou nezávisí na poloze předmětu, obraz bude vždy zmenšený, přímý a neskutečný.

1.6.4 Soustava dvou čoček

Poskládáním dvou nebo více čoček za sebou se společnou optickou osou vznikne nová zobrazovací soustava. Tato soustava je charakterizována ohniskovými vzdálenostmi a celkovou optickou mohutností soustavy [3]. Při zobrazení předmětu takovou soustavou je obraz získaný první čočkou předmětem pro zobrazení druhou čočkou, jak je vidět na Obr. 9., kde je zobrazena optická soustava tvořená dvěma spojnými čočkami, které mají ohniskové vzdálenosti f_1, f'_1, f_2, f'_2 a jejich středy jsou ve vzdálenosti [3]

$$v = f'_1 + \Delta + f'_2 \quad (19)$$

Kde Δ je optický interval a je definován jako vzdálenost mezi obrazovým ohniskem první čočky a předmětovým ohniskem druhé čočky.



Obr. 9: Soustava dvou spojných čoček a jejich zobrazení. Převzato z [10]

Zobrazovaný předmět o výšce y_1 je ve vzdálenosti a_1 od první čočky a jeho obraz je ve vzdálenosti a'_1 , kde tento obraz tvoří předmět o velikosti y_2 pro zobrazení druhou čočkou. Celková ohnisková vzdálenost takovéto soustavy je pak dána vztahem [3]

$$f' = -f = -\frac{f'_1 f'_2}{\Delta} = \frac{f'_1 f'_1}{f'_1 + f'_2 - v} \quad (20)$$

Celková optická mohutnost soustavy je pak rovna [3]

$$D = \frac{1}{f'} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} - \frac{v}{f'_1 f'_2} \quad (21)$$

Pro čočky, které jsou umístěny v těsném kontaktu, a tedy jejich vzdálenost $v = 0$ pak platí pro celkovou optickou mohutnost vztah

$$D = D_1 + D_2 = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} \quad (22)$$

kde D_1 je optické mohutnost první čočky a D_2 druhé čočky.

Jak je vidět na Obr. 9, celkový obraz soustavy je dle předpokladů zvětšený, ale vzhledem k dvojitému zobrazení spojnou čočkou není obraz převrácený podle optické osy.

2 Materiály na výrobu čoček

2.1 Skleněné čočky

Nejčastěji používaný materiál v optice je optické sklo. Na optické sklo jsou kladeny velmi vysoké kvalitativní nároky, optické sklo musí být dokonale průhledné, homogenní, izotropní a v neposlední řadě také čisté. V tabulce 2 jsou uvedeny typy nejčastěji používaných skel v optice s jejich základními vlastnostmi. Hlavní vlastnost každého optického skla je index lomu, který závisí na materiálu, respektive použitých přísadách. Další parametr je Abbeovo číslo, což je nejčastěji používaná veličina pro vyjádření disperze. Čím je Abbeovo číslo vyšší, tím menší má materiál disperzi, a je tedy vhodný pro konstrukci čoček. Velká výhoda skleněných čoček je jejich odolnost vůči poškrábání, vysoká tepelná odolnost a široká škála indexů lomu.

	Značka	Index lomu	Abbeovo číslo	Hustota
borosilikátové korunové	BK 7	1,5163	64	$\rho = 2,53$
korunové	K 2	1,5160	56,8	2,63
flintové barnaté	BaF	1,5569	48,6	3,0
flintové	F 3	1,6129	37,0	3,54
	F 4	1,6166	36,6	3,59
těžké flintové	SF 2	1,6477	33,9	3,86
	SF 6	1,8052	25,5	5,13

Tab. 2: Tabulka nejčastěji používaných optických skel. Převzato z [15]

2.2 Plastové čočky

Plastové čočky jsou dalším rozšířeným materiálem na výrobu čoček. Několik nejčastěji používaných materiálů na výrobu plastových čoček je uvedeno v tab. 3. Plastové čočky mají index lomu srovnatelný se skleněnými čočkami, ale mají nižší hustotu, a tedy i nižší hmotnost. Nevýhoda plastových čoček je, že jsou náchylnější k poškrábání, než skleněné čočky a jsou vhodné pro použití do nižších teplot. Plastové čočky se používají především pro nízkonákladové a mobilní aplikace. Najdeme je například jako čočku fotoaparátu v mobilních telefonech. Další velká oblast využití plastových čoček je jejich užití v brýlích, kde jsou plastové čočky využívány z důvodu nízké hmotnosti, mechanické odolnosti a také bezpečnosti.

Označení	Materiál	Index lomu (-)	Abbeovo číslo (-)	Hustota (g/cm ³)	Max. teplota (°C)
PMMA	Polymethylmetakrylát	1,492	57,0	1,19	90
PC	Polykarbonát	1,590	30,0	1,20	120
CR39	Allyldiglykokarbonát	1,501	57,8	1,32	100
PS	Polystren	1,590	30,8	1,06	95
DPSC	Diphenylsulfidcarbonát	1,612	26,0		
SMMA	Styrenmethylmetakrylát	1,568	33,5	1,08	80
MR8		1,600	42,0		118

Tab. 3: Tabulka nejčastěji používaných plastů. Převzato z [16]

2.3 Kapalinové čočky

Kapalinové čočky umožňují plynulou změnu svých parametrů. Zejména často požadovanou změnu ohniskové vzdálenosti čočky respektive obecně optické soustavy. Tato vlastnost je odlišuje od tradičních soustav složených z čoček ze skla a plastu, kde ke změně ohniskové vzdálenosti dochází nejčastěji změnou vzdálenosti jednotlivých prvků soustavy. Ke změně ohniskové vzdálenosti je tedy potřeba velké množství optických čoček a složitých mechanických součástí. Tím se stává klasická optická soustava složená ze skleněných čoček rozměrnou, složitou a také velmi často náchylnou k mechanickému poškození. Tyto jmenované nevýhody klasických optických soustav, například objektivů fotoaparátů, je možné odstranit použitím kapalinové čočky, kde ke změně ohniskové vzdálenosti dochází změnou tvaru, respektive objemu kapalinové čočky. To činí optické zařízení jednodušším, menším a také lehčím ve srovnání s optickou soustavou tvořenou skleněnými čočkami.

Historie čoček s proměnnou ohniskovou vzdáleností sahá do počátku 17. století, kdy britský fyzik Stehen Gray sestavil mikroskop pomocí kapek vody o průměru jen přibližně 0,3 mm, díky čemuž byl vliv gravitační síly na křivost kapky zanedbatelný. Kapky byly usazeny v desce s miniaturními otvory, přičemž různé průměry otvorů vedly k různým křivostem povrchu vodních kapek, a tím k různým hodnotám zvětšení. V tomto případě byl tvar kapky „řízen“ pouze velikostí otvorů, ve kterých byly kapky usazeny [17].

Dle dostupných zdrojů a odborné literatury se dnes pro výrobu kapalinových čoček nejčastěji používají dva základní principy

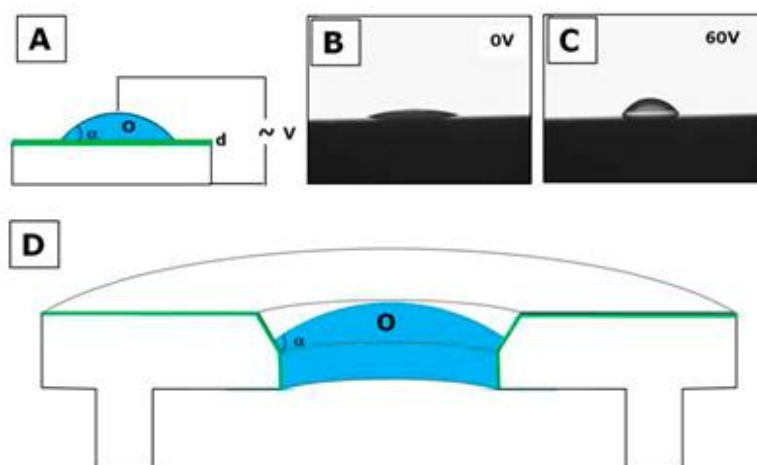
- electrowetting čočky
- membránové čočky

2.3.1 Electrowetting čočky

Termín electrowetting je možné volně přeložit jako závislost smáčivosti na elektrickém napětí. Tento princip je založen na změně smáčivosti kapky tekutiny na pevném dielektrickém povrchu v závislosti na přivedeném napětí mezi kapalinu a elektrodu pod dielektrickou vrstvou. Tuto závislost popisuje Young-Lippmanova rovnice [17]

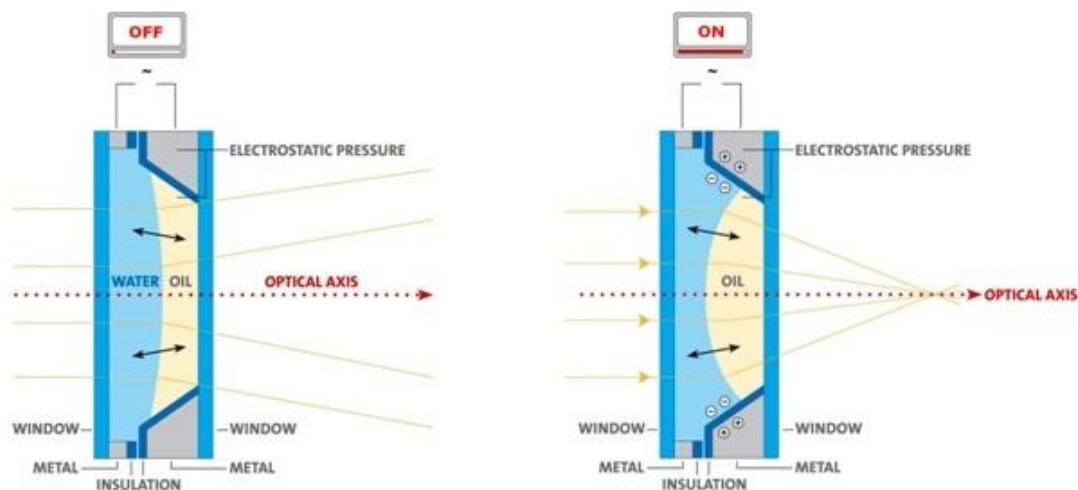
$$\cos \alpha = \cos \alpha_Y + \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0}{2 \cdot d \cdot \sigma_w} \cdot (U - U_{pzc})^2 \quad (23)$$

Kde d je tloušťka dielektrické vrstvy, ϵ_r je relativní permitivita dielektrické vrstvy, σ_w je povrchové napětí na rozhraní kapalina-vzduch, α_Y je úhel normály kapky bez napětí, U je přivedené napětí a U_{pzc} je napětí, vznikající samovolně při ponoření některých materiálů do roztoku [17]. Po připojení napětí dojde ke změně plochy povrchu, mezi kapkou a dielektrickou podložkou, a tím ke změně tvaru kapky, a tím také ke změně optických vlastností, jak je vidět na Obr. 10. Zde je v části A zobrazen princip smáčivosti. Kde na zeleném izolačním povrchu o síle d je modrá kapka tekutiny O, na kterou je připojeno napětí. V části obrázku B je znázorněna kapka bez připojeného napětí a v části C po připojení střídavého napětí 60 V. Kde můžeme vidět, jak došlo ke změně plochy styku kapaliny s podložkou. V části D je schématicky znázorněno praktické provedení.



Obr. 10: Princip elektrosmáčivosti. Převzato z [10]

V praxi se čočka založená na tomto principu skládá ze dvou kapalin, které mají stejnou hustotu a jsou nemísitelné. Další podmínkou je rozdílný index lomu kapalin a jedna z kapalin musí být elektricky vodivá, zatím co ta druhá musí být izolant. Nejčastěji se používá jako izolující kapalina olej a jako vodivá kapalina voda, respektive solný vodný roztok. Tyto dvě kapaliny vzhledem k rozdílnému indexu lomu tak tvoří optické rozhraní a velikost zakřivení tohoto rozhraní, a tím i optické vlastnosti celého systému závisí na přiloženém napětí. Tím se dosahuje proměnlivé ohniskové vzdálenosti čočky.



Obr. 11: Kapalinová čočka založená na elektrosmáčivosti. Převzato z [19]

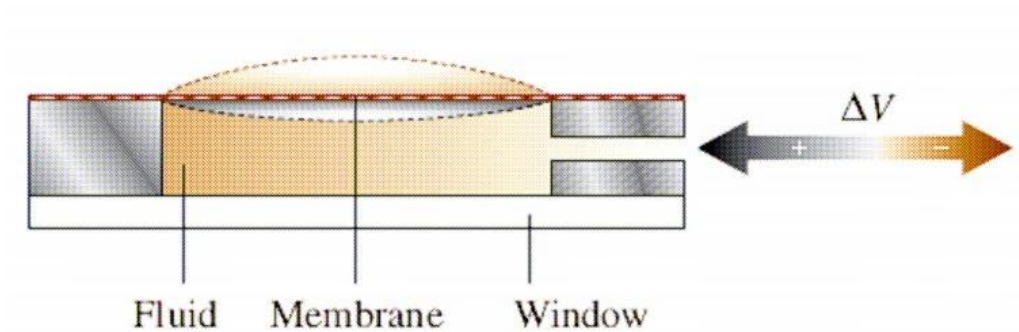
Na obrázku 11 je znázorněna kapalinová čočka od společnosti Varioptic, která se průmyslově vyrábí a prodává pod označením Arctic 16F. Kde výrobce udává rozsah optické mohutnosti od -5 D do +15 D při apertuře 1,6 mm, rychlostí odezvy menší než 10 ms a spotřebě 1 mW. Životnost této čočky je udávána více jak 10^6 cyklů [20].

Tento typ čočky nachází uplatnění v široké škále aplikací, například v endoskopech, mobilních zařízeních, čtečkách čárových kódů atd. Výhoda čočky pracující na tomto principu je velký rozsah optických mohutností, rychlá odezva, nízká spotřeba, velmi malá velikost, tichý provoz a také nízká cena. Nevýhoda je omezený rozsah teplot, ve kterých může být čočka provozována, což je způsobeno přítomností vody.

2.3.2 Membránové čočky

Princip membránové čočky je založen na pružné membráně, ta musí být schopna měnit svůj tvar a napnutí. Typická membránová čočka je znázorněna na obrázku 12, kde je kapalina uzavřena ze třech

stran pevným rámem a z jedné strany pružnou membránou. Změnami objemu kapaliny v zásobníku dochází k vydouvání membrány a změnám tvaru čočky, tím se také mění ohnisková vzdálenost systému. Takto lze vytvořit jak spojnou tak také rozptylnou čočku. V případě kladné změny objemu dojde k vytvoření spojně čočky a naopak v případě záporné změny objemu kapaliny se vytvoří rozptylná čočka.



Obr. 12: Princip fungování membránové čočky. Převzato z [17]

Membrány musejí být velmi pružné, aby mohlo docházet ke změnám tvaru čočky, a zároveň jejich povrch musí být dokonale hladký, aby nedocházelo k rozptylu. Nejčastěji se membrány vyrábějí z polydimethylsiloxanu (PDMS), polyvinylidenchloridu, polyetylenu nebo polyvinylchloridu. Membrány pro kapalinové čočky mají tloušťku v rozmezí 10 až 100 mikrometrů. Jako kapalinu lze použít téměř libovolnou tekutinu. Tekutina musí být čirá, dokonale opticky průhledná a mít index lomu vyšší než okolní vzduch, aby docházelo k lomu světla a vytvořila se tím čočka. Jako akční člen ke změnám objemu kapaliny se používá několik různých principů. Základní princip, který lze použít je mechanická změna objemu pomocí pístu. Dále se v praxi používají piezokeramické aktuátory, kde optický systém je tvořen dvěma komorami, kde jedna komora je čočka s membránou a druhá komora je tvořena zásobníkem s tekutinou, který má deformovatelnou jednu stěnu. Piezokeramický akční člen působí na deformovatelnou stěnu, čímž se v komoře zvýší tlak a dojde k přemístění části tekutiny ze zásobníku do čočky. Tím se vyduje membrána, čímž se změní tvar čočky a dojde ke změně ohniskové vzdálenosti systému. Dalším způsobem změny objemu kapaliny v čočce jsou elektroaktivní polymery, tento princip bude blíže popsán v následující kapitole. Ostatní způsoby jsou zatím ve fázi vývoje a výzkumu, patří mezi ně tepelné a zvukové ovládání.



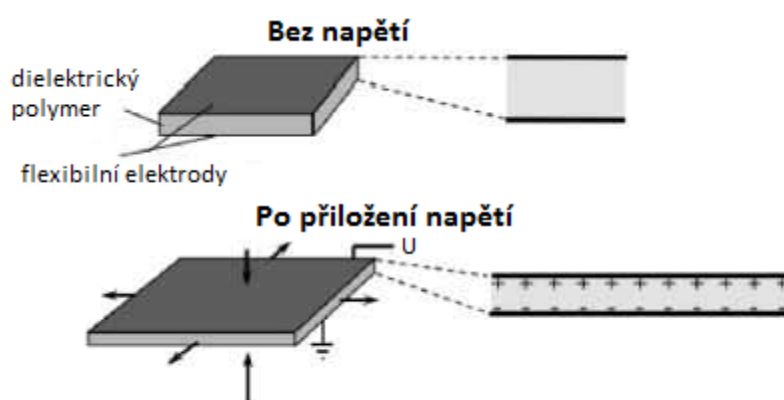
Obr. 13: Princip fungování čočky Optune ML-20-35. Převzato z [23]

Membránové čočky jsou vyráběny komerčně a prodávány v několika variantách. Společnost Optune vyrábí membránové čočky mechanicky ovládané pod označením ML-20-35. Princip fungování čočky ML-20-35 je zobrazen na Obr. 13, čočka je složena z membrány, která je uprostřed zásobníku s kapalinou. Za pomoci kruhového otočného mechanismu dochází ke stlačování zásobníku ve směru šipek. Tím se kapalina přemístí z části zásobníku do části s membránou, která tvoří samotnou čočku. Dle údajů uváděných výrobcem dosahuje systém ML-20-35 rozsahu ohniskových vzdáleností od -40 do +40 mm. Na podobném principu funguje také systém APL-1050 vyráběný firmou Holochip, který dosahuje změn ohniskové vzdálenosti +1000 mm až +30mm. Optický systém ovládaný elektroaktivním polymerem vyrábí taktéž firma Optune pod označením EL-10-30. Tento systém pracuje na podobném principu jako mechanický ML-20-35, jen ve směru šipek na Obr. 13 nepůsobí mechanická síla, ale zásobník je stlačován pomocí elektroaktivního polymeru.

3 Experiment

3.1 Aktuátor

Jak již bylo zmíněno, aktuátor, který ovládá optickou mohutnost kapalinové čočky, je vyroben z elektroaktivního polymeru (EAP). Použitý EAP je dielektrického typu a je vyroben z akrylátové pásky VHB 4910, kterou vyrábí společnost 3M. Princip činnosti dielektrického EAP je obdobný deskovému kondenzátoru. Dielektrický materiál je umístěn mezi dvě elektrody a po připojení napětí se začnou elektrody vlivem elektrostatické síly přitahovat [1]. Tento základní princip je znázorněn na Obr. 14.



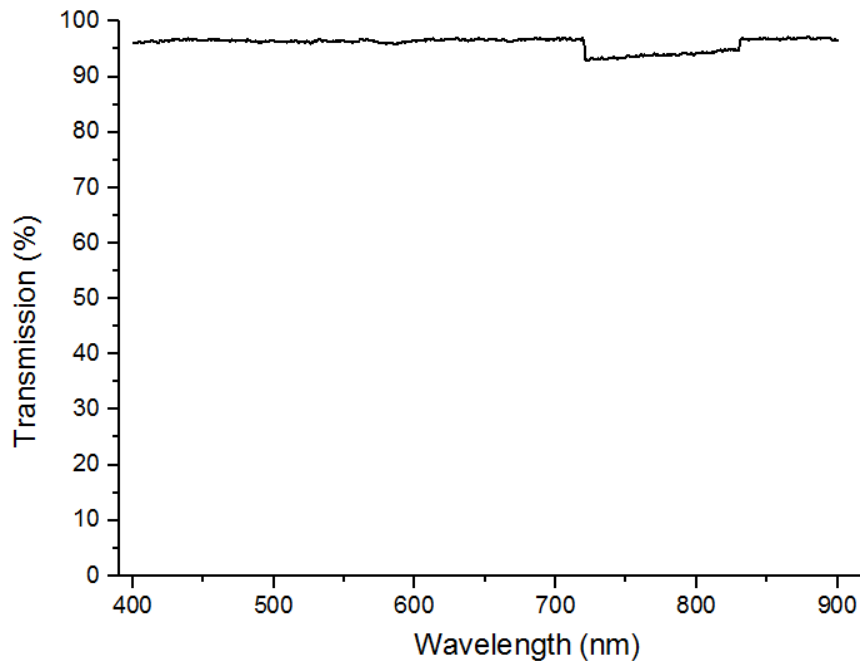
Obr. 14: Princip dielektrického EAP. Převzato z [25]

Akrylátová páska VHB 4910 se vyrábí v tloušťce 1 mm. Tato tloušťka je na výrobu aktuátoru nevhodná, proto je nutné pásku předeprnout o 300 %, tím dosáhneme výsledné tloušťky přibližně 60 mikrometrů. Snížením tloušťky dielektrika dosáhneme větší síly aktuátoru. Více informací o dielektrickém EAP a dalších typech EAP obsahuje [1]. Na výrobu elektrod se nejčastěji používá jemný grafitový pudr. Výhoda jeho použití je dobrá vodivost, snadná aplikace vetřením do lepivého povrchu membrány a možnost vytvořit velmi tenkou a poddajnou elektrodu.

Ovládací napětí pro řízení dielektrického EAP jsou jednotky kilovoltů, pro tuto aplikaci je vhodné použít napětí 1 kV až 5 kV. Při nižších napětích není dostatečná intenzita elektrického pole pro viditelnou změnu tvaru ani pohybu aktuátoru. Naopak při použití vyšších napětí dochází k elektrickému proražení dielektrika a znehodnocení celé soustavy, protože hodnota napětí 5 kV vztahovaná k dané tloušťce membrány dává hodnotu velmi blízkou průrazné intenzitě (dielektrické pevnosti) materiálu.

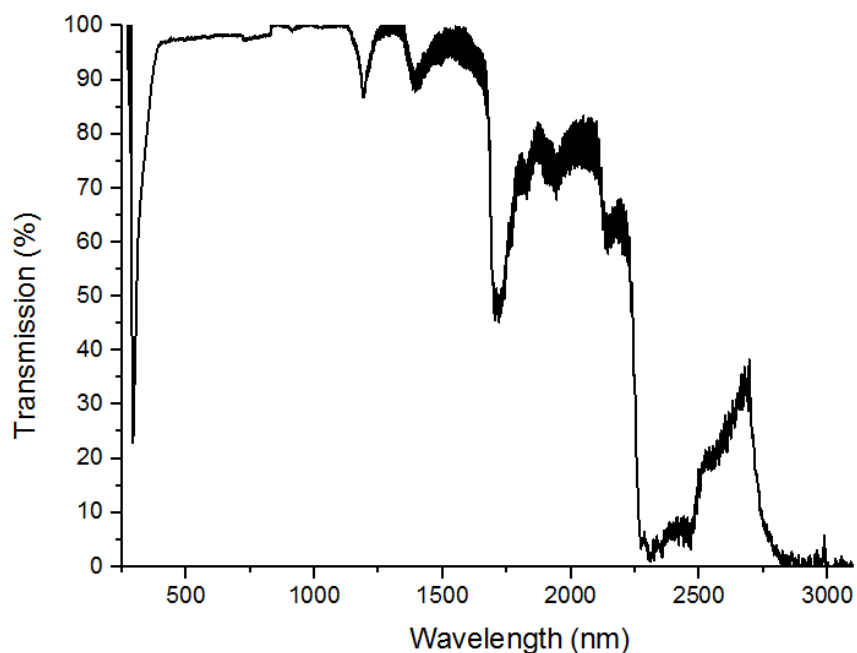
3.2 Membrána čočky

V navrhovaných soustavách je na výrobu membránových čoček použita průhledná akrylátová páska VHB 4910. Jedná se o stejný materiál, ze kterého je vyroben aktuátor ovládající soustavu. Tento materiál byl zvolen proto, neboť je velice elastický, tenký a také průhledný. Další výhodou použití tohoto materiálu je také to, že v soustavě tvoří s aktuátorem jeden celek a je tak minimalizována možná netěsnost spoje více materiálů.



Obr. 15: Graf transmise materiálu VHB 4910 ve viditelném spektru. Převzato z [28]

V rámci zkoumání vhodnosti materiálu VHB 4910 na výrobu optické čočky byla měřena transmise vzorku materiálu. Transmise neboli propustnost udává poměr intenzity světla prošlého vzorkem k intenzitě světla dopadajícího na vzorek. Graf na obrázku 15 udává propustnost světla ve viditelném spektru, tedy od 380 nm do 780 nm. Propad transmise na grafu v rozmezí 730 nm až 850 nm není způsoben náhlou změnou propustnosti materiálu v tomto rozmezí, ale je způsoben přepnutím rozsahu měřicího přístroje. Z grafu vyplývá, že transmise materiálu je v celém viditelném spektru téměř konstantní a to přibližně 96 %. Zbylá 4% světelného záření byla materiálem odražena zpět ke zdroji záření, nebo byla materiálem pohlcena a tedy přeměněna na teplo.



Obr. 16: Graf transmise materiálu VHB 4910 v rozšířeném spektru. Převzato z [28]

Na obrázku 16 je zobrazen graf transmise vzorku VHB 4910 v širokém spektru vlnových délek. Od oblasti ultrafialového záření, přes oblast viditelných vlnových délek až po oblast infračerveného záření. Z grafu je patrné, že pro oblast ultrafialového záření, tedy do vlnových délek 350 nm není materiál vhodný, neboť transmise v této oblasti dosahuje jen 25%. Pro oblast viditelného záření dosahuje materiál přijatelných 96%. Ještě pro oblast blízkého infračerveného záření má materiál použitelnou hodnotu. Pro větší vlnové délky již není VHB 4910 příliš vhodný.

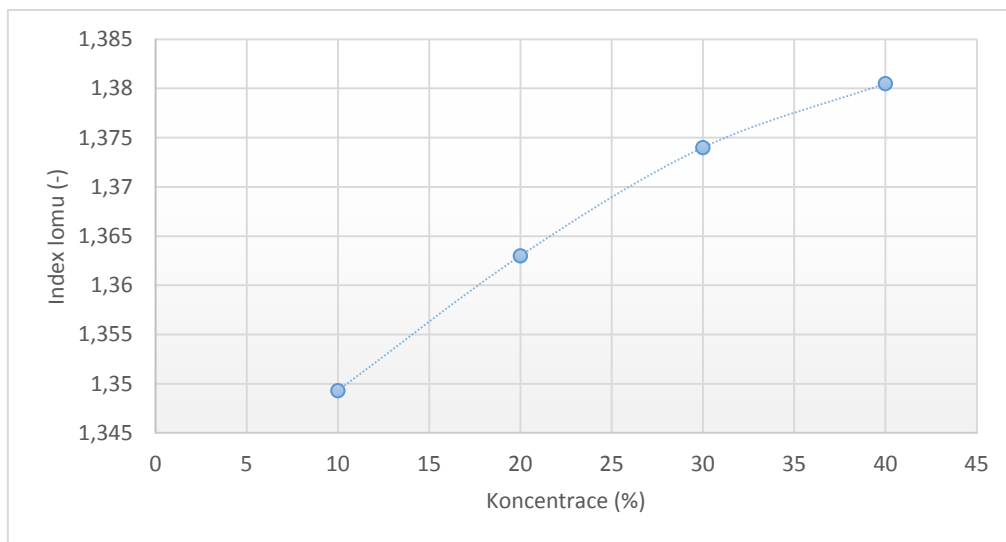
3.3 Kapalina čočky

Jako kapalina na výrobu membránových čoček se nejvíce osvědčila voda a vodné roztoky, protože je dokonale průhledná, neagresivní k membráně a dalším prvkům soustavy. Má index lomu větší než vzduch, proto ji lze na výrobu čočky použít. Aby bylo možné vodu použít jako vnitřní elektrodu zásobníku, který je ovládán EAP, byl do vody přidán chlorid sodný. Přidání chloridu sodného do vody ovlivní její index lomu. To dokládá Tab. 4 naměřených indexů lomu pomocí Abbeova refraktometru.

Roztok NaCl (%)	10	20	30	40
Index lomu (-)	1,3493	1,363	1,374	1,3805
Teplota (°C)	23,4	23,5	23,6	23,7

Tab. 4: Změna indexu lomu v závislosti na koncentraci NaCl

Jak můžeme vidět z grafu na Obr. 17, se zvyšující se koncentrací NaCl v roztoku stoupá také výsledný index lomu roztoku. Tento nárůst je způsoben tím, že sůl má vyšší index lomu, a s přibývajícím množstvím soli v roztoku stoupá také výsledný index lomu. Roztoky byly měřeny do koncentrace 40 %, protože při vyšších koncentracích NaCl v roztoku docházelo k nasycení roztoku a další sůl se již v roztoku nerozpustila.



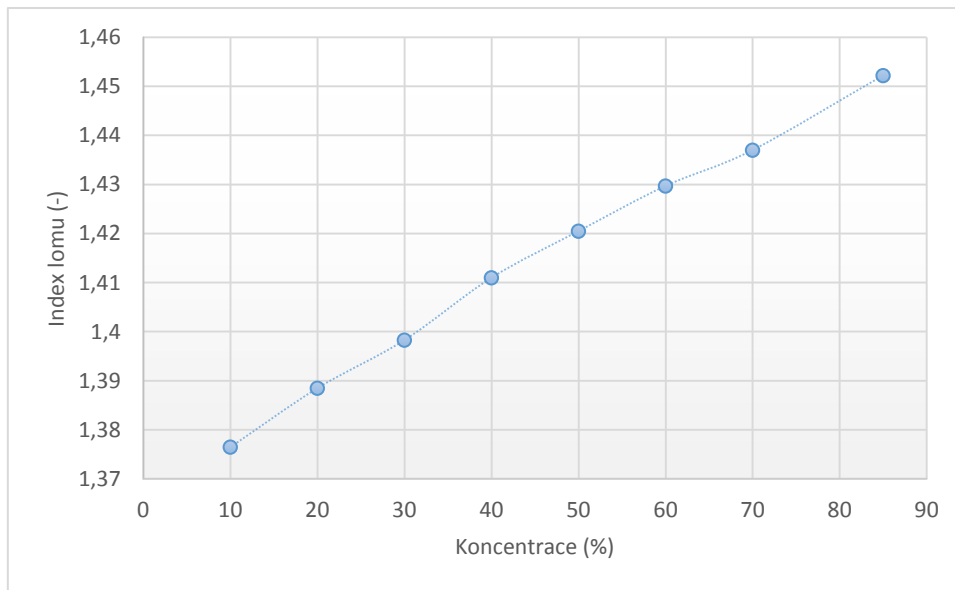
Obr. 17: Graf závislosti indexu lomu na koncentraci roztoku NaCl

Pro soustavy, kde nemusí být kapalina vodivá, je možné použít i jiné průhledné kapaliny. Jako další kapalina byl vybrán glycerol, protože nereaguje s použitou membránou, je transparentní a dobře dostupný. Při měření indexu lomu byly změřeny také jeho roztoky pro následný návrh optické soustavy. Glycerol je bezbarvá viskózní kapalina. V porovnání s vodou má glycerol vyšší hustotu a také vyšší index lomu. Vliv koncentrace glycerolu na index lomu je uveden v tabulce 5

Roztok glycerolu (%)	10	20	30	40	50	60	70	85
Index lomu (-)	1,3765	1,3885	1,3983	1,411	1,4205	1,4297	1,437	1,4522
Teplota (°C)	23,8	23,8	23,9	23,9	23,9	23,9	24	24,1

Tab. 5: Změna indexu lomu v závislosti na koncentraci glycerolu

Další možná nevodivá látka na vytvoření kapalinové membránové čočky je silikonový olej, ten má dle Tab. 1 index lomu 1,520.



Obr. 18: Graf závislosti indexu lomu na koncentraci roztoku glycerolu

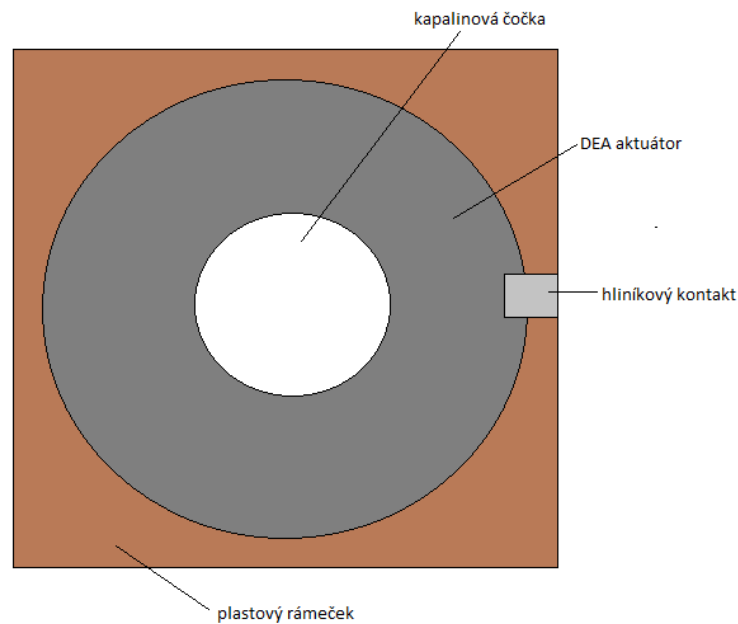
3.4 Optické soustavy

V rámci práce bylo navrženo a realizováno několik typů optických soustav s měnitelnou ohniskovou vzdáleností. Soustavy je možné rozdělit na dva základní principy. První typ optické soustavy je membránová čočka přímo ovládaná EAP dielektrického typu. Druhý typ optické soustavy je membránová čočka se zásobníkem kapaliny. Zásobník s kapalinou je ovládán EAP a pomocí přepumpování kapaliny ze zásobníku do čočky je řízena optická mohutnost, respektive ohnisková vzdálenost čočky. U obou typů soustav je realizováno několik vzorků s různými parametry.

3.4.1 Membránová čočka přímo řízená EAP

Tato soustava se skládá ze dvou akrylátových membrán, mezi kterými je umístěna téměř libovolná průhledná kapalina. V tomto případě nezáleží na vodivosti kapaliny, protože kapalina je umístěna v neaktivní části a je ovládaná okolním aktuátorem. Pro tento druh čočky je nejvhodnější kapalina destilovaná voda. Lze také použít libovolnou čistou kapalinu, v této práci jsou dále testovány glycerol a silikonový olej. Mezikruží mezi čočkou a rámem je pokryto vodivými elektrodami z grafitového pudru. Toto mezikruží je tedy aktivní část, která tvoří dielektrický aktuátor. Princip tohoto typu je znázorněn na Obr. 19. Uprostřed soustavy je umístěna membránová kapalinová čočka o průměru 32 mm, na kterou navazuje aktivní část. Menší průměr mezikruží aktivní části je tedy 32 mm a větší průměr je

100 mm. Tato plocha aktuátoru umožňuje natahovat membránovou čočku, a tím plynule měnit ohniskovou vzdálenost.

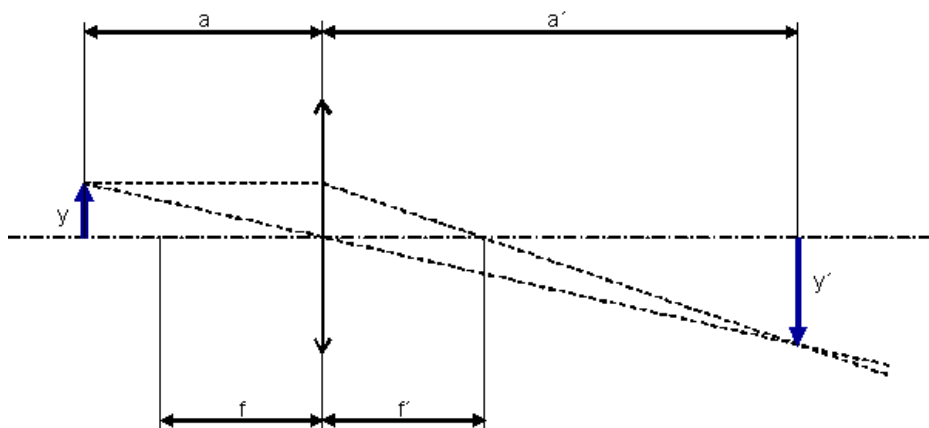


Obr. 19: Princip přímo ovládané membránové čočky

Závislost optické mohutnosti na napětí byla měřena přímou metodou. Tato metoda vychází přímo ze zobrazovací rovnice čočky (17), po úpravě této rovnice do tvaru vhodného pro výpočet ohniskové vzdálenosti dostaneme

$$f' = \frac{a \cdot a'}{a - a'} \quad (23)$$

Kde f' je ohnisková vzdálenost, a je předmětová vzdálenost a a' je obrazová vzdálenost. Princip této metody je znázorněn na Obr. 20 a spočívá v zobrazování předmětu umístěného ve vzdálenosti a od čočky. Po průchodu čočkou je na stínítku hledán ostrý obraz předmětu. Pro minimalizaci chyby měření je vhodné tuto vzdálenost určit vícekrát a použít průměrnou hodnotu.



Obr. 20: Schéma měření ohniskové vzdálenosti přímou metodou. [26]

Tento typ soustavy byl realizován a měřen v několika následujících konfiguracích.

- 6 ml destilované vody

napětí (kV)	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
a' (cm)	23	22	21	19	18	17	16	14	12,5	11	10
f (cm)	9,06	9,23	9,41	9,88	10,17	10,52	10,95	12,13	13,54	15,89	18,57
φ (D)	11,04	10,84	10,62	10,12	9,83	9,50	9,13	8,24	7,38	6,29	5,38

- 3 ml destilované vody

napětí (kV)	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
a' (cm)	76	73	71	66	52	50	38	34	28	21,5	20
f (cm)	11,52	11,59	11,64	11,79	12,38	12,50	13,57	14,17	15,56	18,70	20,00
φ (D)	8,68	8,63	8,59	8,48	8,08	8,00	7,37	7,06	6,43	5,35	5,00

- 1,5 ml destilované vody

napětí (kV)	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
a' (cm)	72	65	60	60	58	56	53	46	42	36	34
f (cm)	38,30	40,63	42,86	42,86	43,94	45,16	47,32	54,76	61,76	81,82	94,44
φ (D)	2,61	2,46	2,33	2,33	2,28	2,21	2,11	1,83	1,62	1,22	1,06

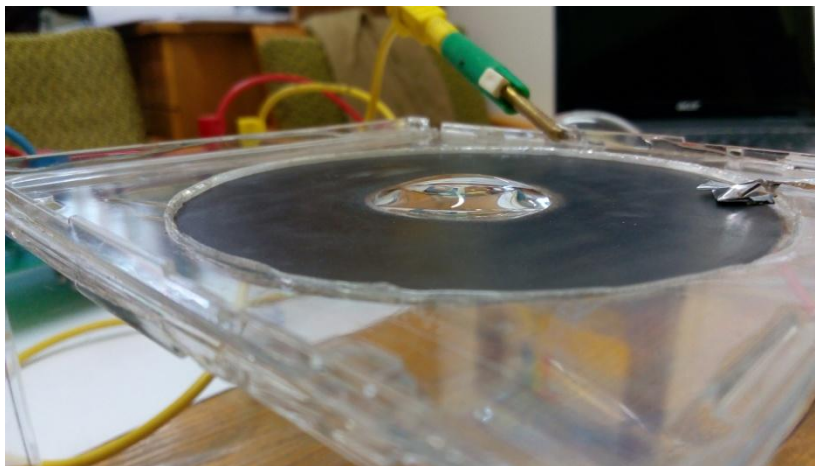
- 2 ml silikonový olej

napětí (kV)	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
a' (cm)	77	76	74	70	67	60	49	38	30	24	20
f (cm)	14,22	14,25	14,32	14,48	14,62	15,00	15,89	17,54	20,00	24,00	30,00
φ (D)	7,03	7,02	6,98	6,90	6,84	6,67	6,29	5,70	5,00	4,17	3,33

- 2 ml glycerolu 85 %

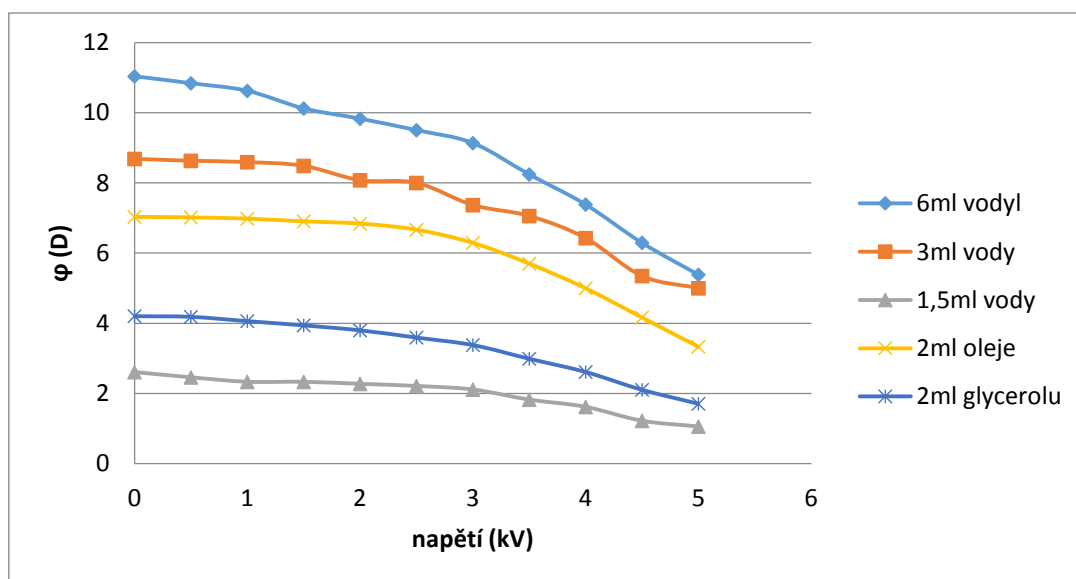
napětí (kV)	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
a' (cm)	74	73	67	62	57	51	46	39	34	29	26
f (cm)	23,79	23,89	24,61	25,36	26,31	27,82	29,57	33,43	38,25	47,45	58,5
φ (D)	4,20	4,19	4,069	3,949	3,81	3,59	3,38	2,991	2,61	2,11	1,71

Měřením bylo zjištěno, že vzorek membránové čočky naplněné 6 ml destilované vody má optickou mohutnost 11,04 D bez připojeného napětí. Při maximálním napětí 5 kV dosahuje tato čočka optické mohutnosti 5,38 D. To představuje pro změnu napětí v rozsahu 0 kV až 5 kV změnu optické mohutnosti o 5,66 D. Vzorek naplněný polovičním množstvím destilované vody, tedy 3ml, vykazuje bez připojeného napětí mohutnost 8,68 D a při maximálním napětí 5 kV dosahuje optické mohutnosti 5 D. Změna optické mohutnosti je tomto případě 3,68 D. Vzorek naplněný 1,5ml destilované vody vykazuje bez připojeného napětí optickou mohutnost 2,61 D a při 5 kV mohutnost 1,06 D, optická mohutnost se v tomto případě mění o 1,55 D. Vzorek naplněný 2 ml silikonového oleje vykazuje bez napětí optickou mohutnost 7,03 D a při maximálním napětí 3,33 D, tedy změnu o 3,7 D. Větší optická mohutnost tohoto vzorku při naplnění 2 ml kapaliny ve srovnání s vzorkem naplněným 1,5 ml vody je dán větším indexem lomu silikonového oleje viz Tab. 1. Vzorek naplněný 2 ml 85 % roztokem glycerolu vykazuje bez připojeného napětí optickou mohutnost 4,20 D a 1,71 D při napětí 5 kV. Změna optické mohutnosti pro tento vzorek je 2,49 D.



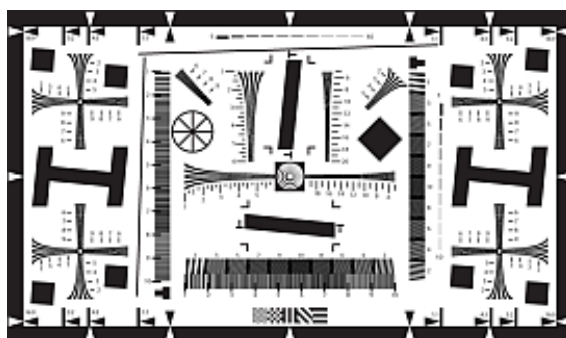
Obr. 21: Vzorek přímo ovládané čočky naplněný 6ml destilované vody.

Klesající trend optické mohutnosti na grafu na Obr. 22 je způsoben natahováním elastické čočky směrem k rámu soustavy. Současně při natahování dochází ke zvětšování poloměru zakřivení optických ploch membrány, a tím ke zmenšení optické mohutnosti.



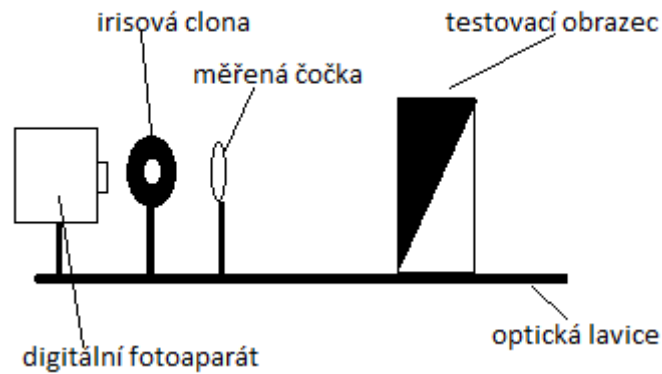
Obr. 22: Graf závislost optické mohutnosti na napětí pro několik vzorků.

Další důležitá vlastnost optické soustavy je, jak kvalitní přenos obrazu poskytuje. Pro zjištění kvality zobrazení byla pro dostupnost zvolena metoda měření rozptylové funkce hrany (ESF -Edge spread function). Tato charakteristika udává, jak věrně dokáže optická soustava přenést obraz, který je tvořen ostrou hranou přechodu černé a bílé barvy. Jako předloha pro měření ESF byl použit testovací obrazec Daneš Picta DCR3, který je znázorněn na Obr. 23.



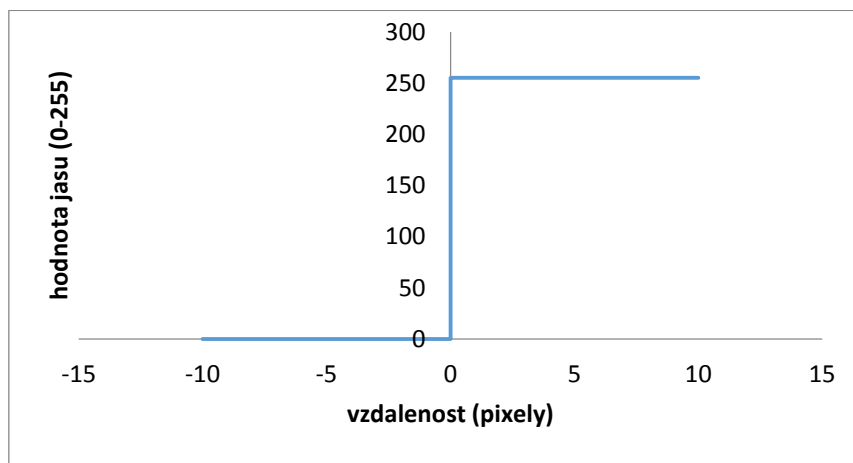
Obr. 23: Testovací obrazec Daneš Picta DCR3 [27]

Tento obrazec odpovídá normě ISO 12233 a umožňuje měřit další přenosové parametry optických soustav a fotoaparátů. Pracoviště pro měření bylo uspořádáno podle Obr. 24, kde na optické lavici byl umístěn digitální fotoaparát bez objektivu, irisová clonka, měřená optická soustava a osvětlený testovací obrazec. Testovací obrazec byl promítán na měřenou čočku a dále pak na snímací čip digitálního fotoaparátu. Pro sledování omezení optických vad byla před fotoaparát umístěna irisová clonka a snímaná scéna byla snímána pro několik nastavení clonky. Výsledné snímky byly poté analyzovány pomocí programu Imatest.



Obr. 24: Uspořádání pracoviště pro měření přenosových parametrů soustav

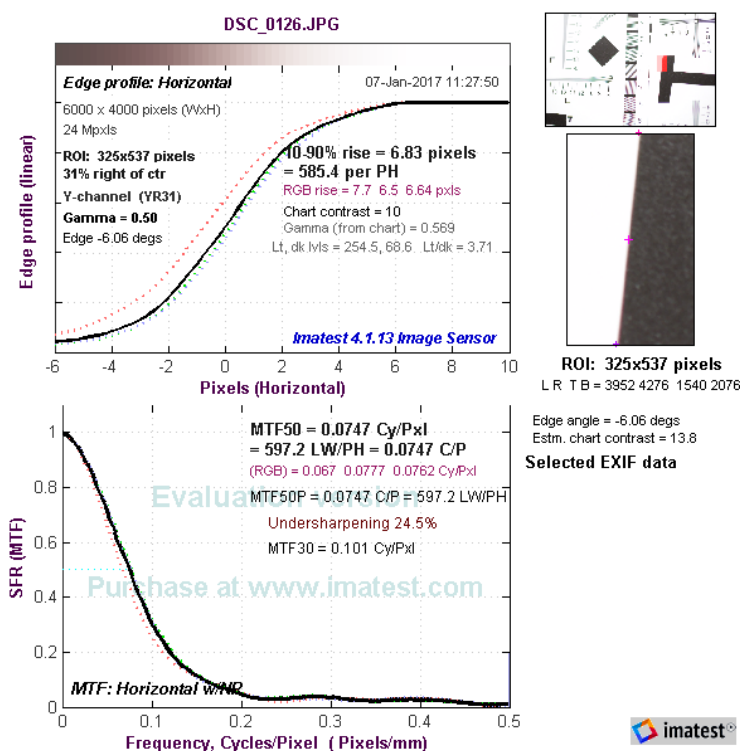
Program Imatest vykreslí přechod jasu jednoho řádku ve vybrané oblasti. V případě opticky dokonalé optické soustavy bude přechod jasu na sejmutém snímku roven jednotkovému skoku. Tento ideální přechod jasu snímku je znázorněn na Obr. 25. Kde je v šedotónové stupnici znázorněn přechod z černé barvy (hodnota jasu 0) do bílé (hodnota jasu 255).



Obr. 25: Ideální přechod jasu na hraně

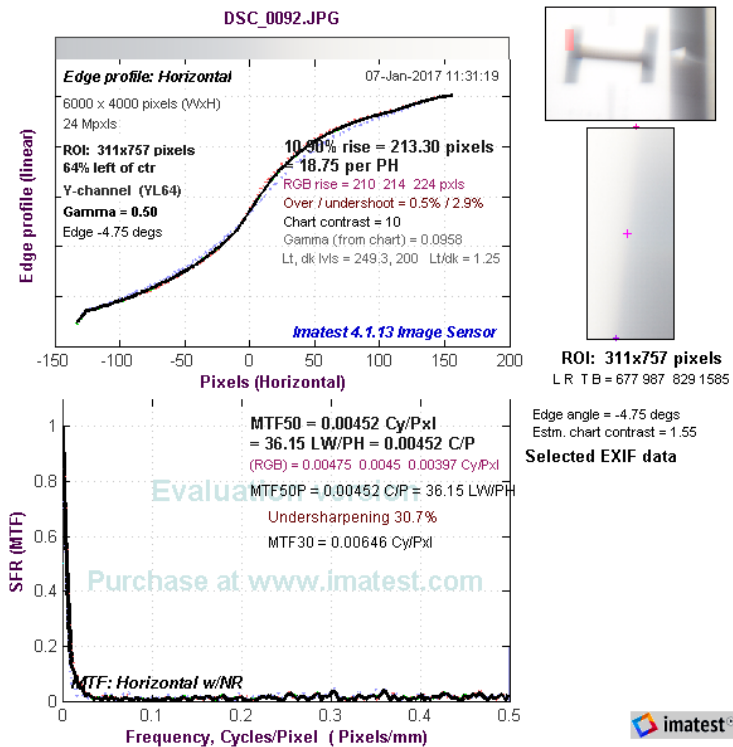
Tohoto ideálního zobrazení není možné v praxi dosáhnout, protože žádný dnes známý optický člen nemá ideální vlastnosti. Na Obr. 26 je pro porovnání uveden výstup měření z programu Imatest pro standardní objektiv fotoaparátu Tamron, kde v pravém horním rohu obrázku je vyobrazen vstupní snímek předlohy pořízený fotoaparátem. Pod ním je ROI (Region of Interest), tedy vybraná hrana, která se bude analyzovat. Vlevo nahoře je vykreslen graf ESF, přechod mezi černou a bílou barvou na měřené hraně. Strmost hrany se udává jako vzdálenost pro nárůst jasu z 10 % na 90 %, kde menší vzdálenost značí lepší kvalitu (ostrost). V případě tohoto objektivu byla naměřena vzdálenost 6,83 pixelů. Barevné tečkované čáry na grafu ESF znázorňují barevnou vadu. Pod grafem ESF je vyobrazen graf MTF, označovaný také jako SFR. MTF je definována jako pokles amplitudy signálu v závislosti na prostorové frekvenci obrazu. Udává tedy jaké množství detailů je optická soustava schopna přenést

a rozlišit. Kvalitní optická soustava má MTF pomalu klesající směrem k vyšším prostorovým kmitočtům. V praxi se nejčastěji používá pro porovnání kvality charakteristika MTF50. Ta udává prostorovou frekvenci, při níž klesne MTF na 0,5 neboli 50 % své hodnoty na nulové frekvenci. Prostorová frekvence se udává v jednotkách LW/PH (line widths per picture height), tedy počet čar na výšku obrazu. Další jednotky používané pro popis prostorové frekvence jsou Cy/Px (Cycles per pixel), tedy počet změn na pixel. U tohoto objektivu byla naměřena MTF50 rovná 597,2 LW/PH.

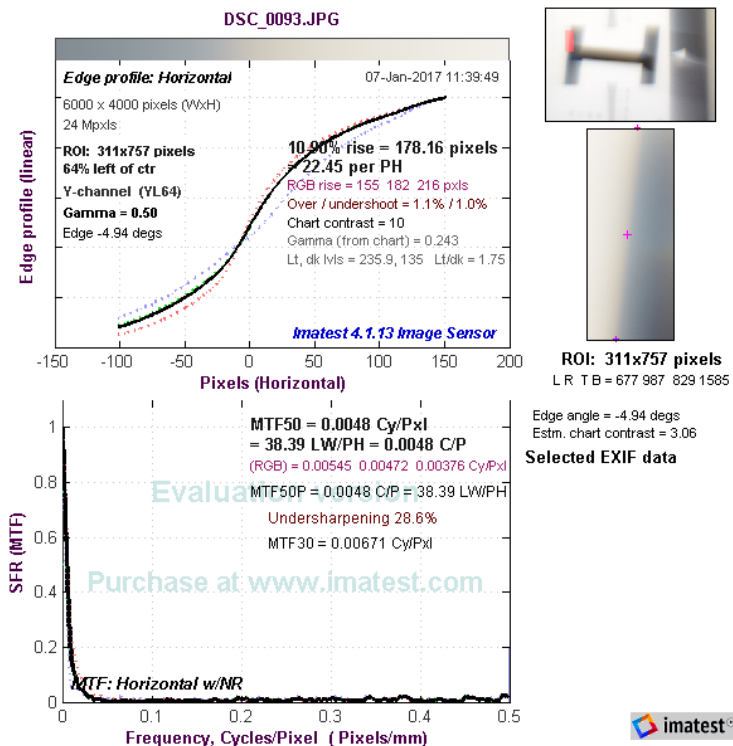


Obr. 26: Výstup měření standardního objektivu Tamron ImaTestem. Vpravo nahoře je vstupní snímek, pod ním vybraná hrana (ROI), vlevo nahoře je graf ESF a pod ním graf MTF.

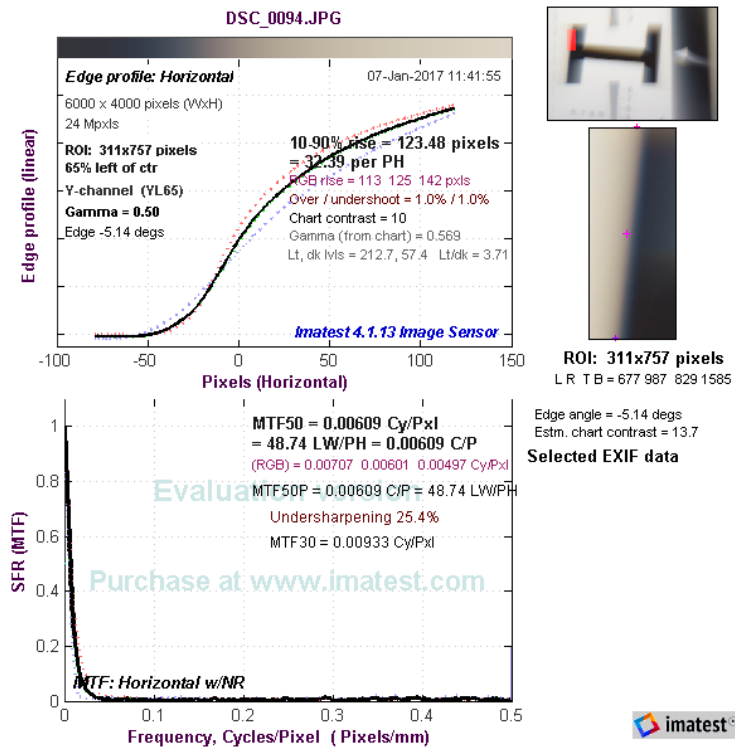
Přenosové charakteristiky tohoto typu čočkových soustav byly měřeny u vzorku naplněného 6 ml destilované vody pro několik nastavení průměru clony. Na Obr. 27 je výsledek měření bez použité clony. Z obrázku je patrné, že přechod mezi černou a bílou je velmi postupný, konkrétně 213,3 pixelů. Kontrast mezi černou a bílou je také velmi špatný, charakteristika MTF50 dosahuje pouze 36,15 LW/PH.



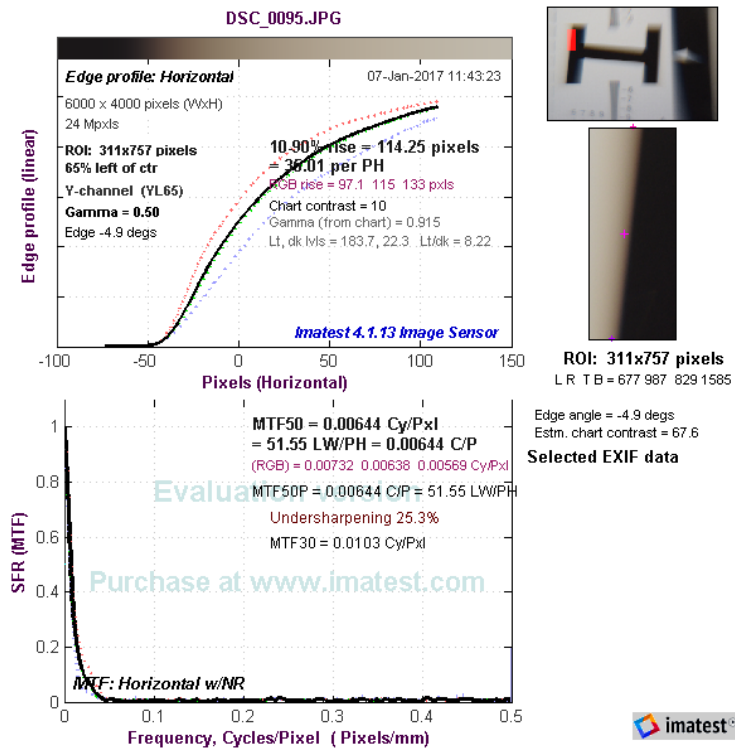
Obr. 27: Výsledek měření vzorku bez použití clony



Obr. 28: Výsledek měření vzorku při použití clony o průměru 18 mm.



Obr. 29: Výsledek měření vzorku při použití clony o průměru 10 mm.

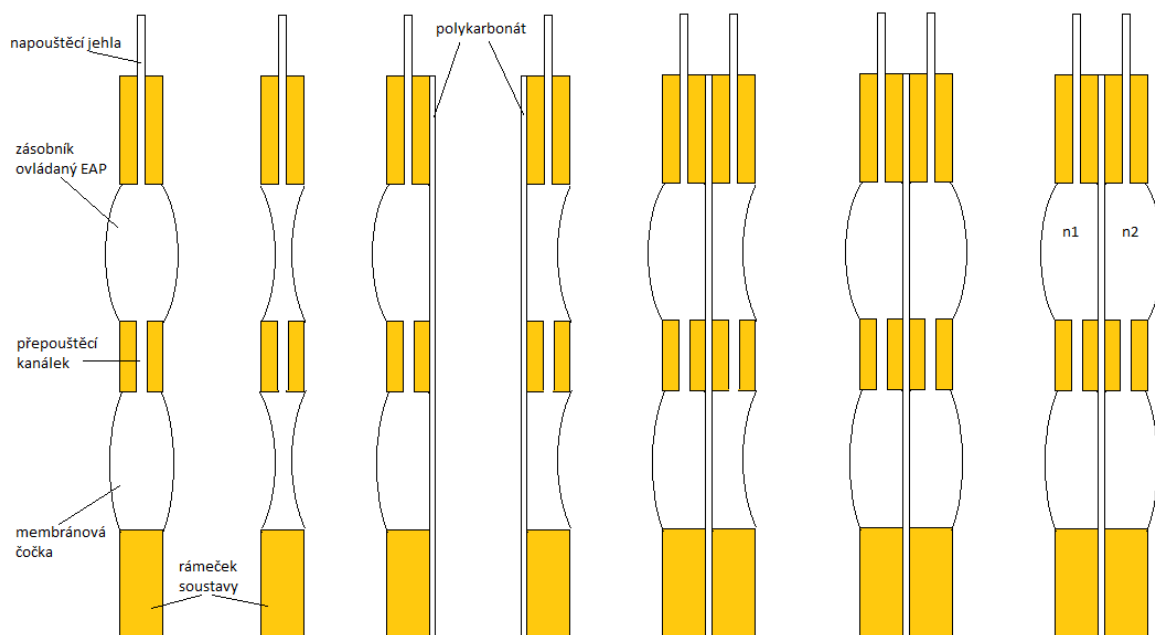


Obr. 30: Výsledek měření vzorku při použití clony o průměru 5 mm.

Z předešlých obrázků je patrné, že se zmenšujícím se průměrem clony se zlepšuje kontrast a také ostrost obrazu. Při použití clony o průměru 18 mm má přechod vzdálenost 178,16 pixelů a MTF50 38,39 LW/PH. V případě clony o průměru 10 mm je přechod dlouhý 123,48 pixelů a MTF50 48,74 LW/PH. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při použití clony o průměru 5mm, kdy vzdálenost přechodu vyšla 114,25 pixelů a MTF50 51,55 LW/PH. Jak je z předchozích obrázků patrné, s větší ostrotí přechodu se na grafech objevují také barevné vady. Možnostmi korekce barevných vad se bude zabývat další kapitola.

3.4.2 Membránová čočka se zásobníkem

Tento princip kapalinové čočky vychází z [1], kde bylo ověřeno na dvojevypuklé spojce, že tento způsob ovládní optické mohutnosti je možné použít. V této práci jsou navrženy a změřeny další možné typy membránových čoček pracujících na tomto principu. U všech vzorků je membrána čočky tvořena akrylátovou páskou VHB4910, stejně jako dielektrický aktuátor. Průměr čočky je 32 mm, stejně jako průměr aktivního zásobníku. Zásobník a membránová čočka jsou propojeny přepouštěcím kanálkem, kterým dochází k přečerpávání kapaliny do nebo ze zásobníku. Soustava je dále opatřena napuštěcí trubičkou, která je vyrobena ze zabroušené injekční stříkačky. Injekční jehla byla použita ze dvou důvodů, první důvod je snadné připojení k injekční stříkačce, kterou se soustava plní kapalinou. Druhý důvod je využití skutečnosti, že injekční jehla je vyrobena z vodivého materiálu, a je tedy použita jako kontakt. Jehla se používá jako kontakt pro vodivou kapalinu, která slouží zároveň jako elektroda pro EAP. Druhá elektroda EAP je tvořena grafitovým pudrem, který zajišťuje dokonale pružnou elektrodu. Celá soustava je postavena na základním plastovém rámu. Konkrétně se jedná o kombinaci polykarbonátových desek s tloušťkou 0,75 mm a v případě rozptylných čoček také tvrzeného PVC o tloušťce 10 mm. Pro potlačení nežádoucího prostupu světla rámem soustavy a nechtěným odrazům světla jsou desky nastříkány černou matnou barvou.



Obr. 31: Navržené typy membránových čoček se zásobníkem.

Konstrukce membránových čoček se zásobníkem umožňuje vytvořit různé typy čoček. To bohužel membránové čočky přímo ovládané neumožňují. V případě membránových čoček přímo ovládaných lze vytvořit pouze dvojbypuklou spojnou čočku. Na Obr. 31 jsou vyobrazeny některé možné varianty čoček se zásobníkem. Vpravo na obrázku je vyobrazena dvojbypuklá spojná čočka, která byla blíže popsána v [1]. V pořadí druhá zprava je dvojbypuklá rozptylná čočka. Třetí v pořadí je ploskovypuklá spojná čočka, kde jedna část membrány je nahrazena průhledným pevným materiálem. V tomto případě se jedná o tenkou destičku z polykarbonátu, který má dobré optické vlastnosti. Dalším vhodným materiálem je sklo. Čtvrtá soustava je ploskovypuklá rozptylná čočka, tato konstrukce je podobná předchozí variantě. Liší se pouze tím, že po naplnění soustavy kapalinou se v soustavě vytvoří podtlak, čímž dojde k vyduť membrány. Další soustavy na obrázku jsou kombinací předchozích variant. Další v pořadí je soustava vytvářející dutovypuklou spojnou čočku, která vznikne spojením ploskovypuklé spojky a dutovypuklé rozptylky. Šestá soustava na obrázku je dvojbypuklá spojná čočka, která je uprostřed rozdělena tenkou vrstvou polykarbonátu. U této čočky je možné jednak naplnit každou polovinu jiným množstvím kapaliny a také každou polovinu samostatně ovládat. Poslední vyobrazená verze je konstrukčně totožná s předchozí, ale předpokládá se naplnění každé poloviny jinou kapalinou, respektive kapalinami s rozdílným indexem lomu.



Obr. 32: Reálná podoba soustav, konkrétně ploskovypuklé rozptylky a ploskovypuklé spojky.

Pro případ spojných čoček se zásobníkem byly měřeny následující vzorky. Ploskovypuklá spojná čočka naplněná 6 ml deseti procentním solným roztokem a dvojjvypuklá spojná čočka naplněná dvěma kapalinami s různým indexem lomu. Konkrétně 3 ml desetiprocentního solného roztoku a 3 ml silikonového oleje. Tyto dvě kapaliny jsou odděleny polykarbonátovou destičkou, jak je znázorněno na Obr. 31. Část čočky naplněná olejem je neaktivní a ovládaná EAP je pouze druhá část.

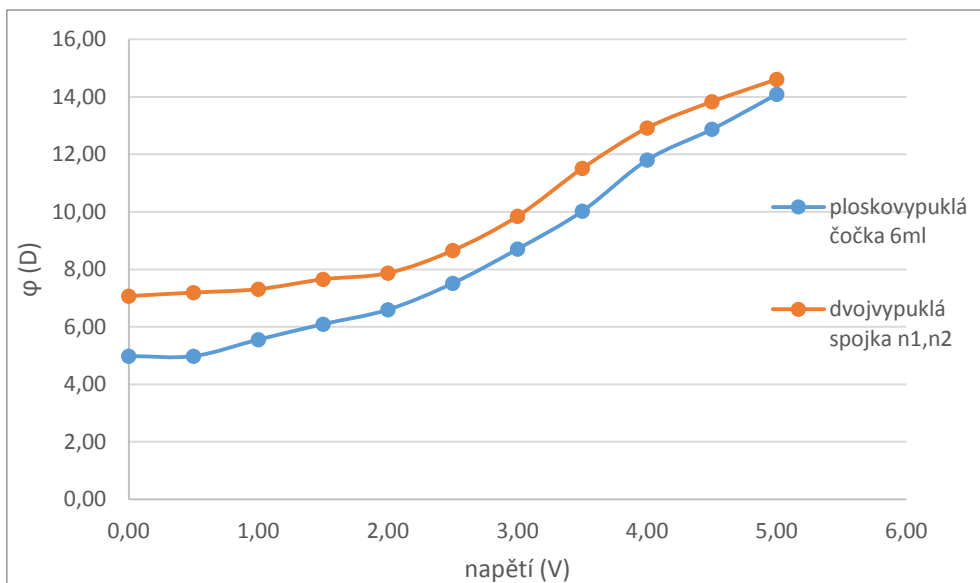
- Ploskovypuklá čočka naplněná 6 ml roztoku NaCl

napětí (V)	0,00	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00
a' (cm)	5,80	5,80	6,00	6,20	6,40	6,80	7,40	8,20	9,60	10,70	12,30
f (cm)	20,08	20,08	18,00	16,41	15,16	13,30	11,48	9,97	8,47	7,77	7,10
φ (D)	4,98	4,98	5,56	6,09	6,60	7,52	8,71	10,03	11,81	12,88	14,09

- Dvojjvypuklá spojná čočka, naplněná 3 ml roztoku NaCl a 3ml silikonového oleje

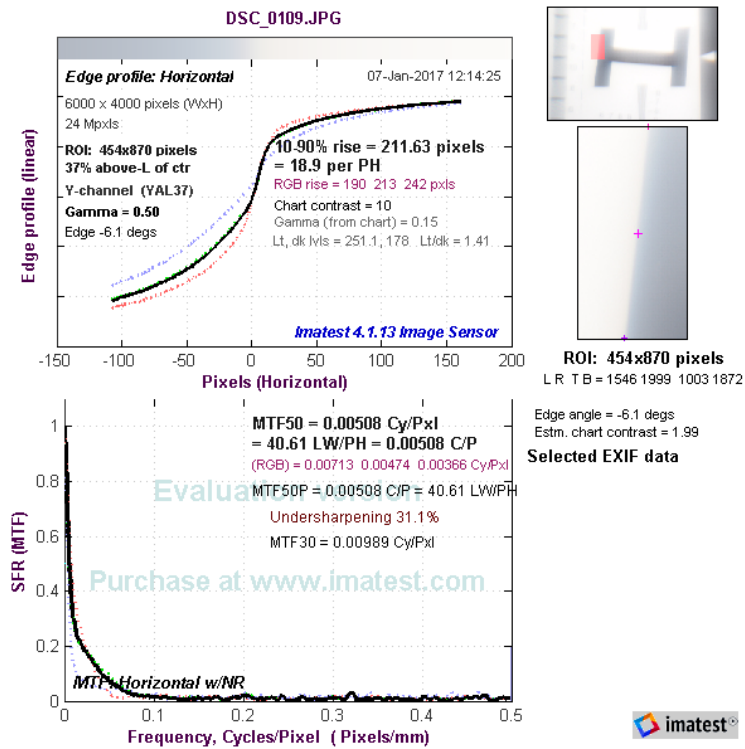
napětí (V)	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
a (cm)	9	9,1	9,2	9,5	9,7	10,5	12	15	19	23	28
f (cm)	14,14	13,90	13,68	13,06	12,70	11,55	10,15	8,68	7,74	7,23	6,84
φ (D)	7,07	7,19	7,31	7,66	7,87	8,66	9,85	11,52	12,92	13,83	14,61

Měřením bylo zjištěno, že ploskovypuklá spojka naplněná 6 ml desetiprocentního roztoku NaCl dosahuje bez připojeného napětí optické mohutnosti 4,98 D. Při napětí 5 kV dosahuje tato čočka optické mohutnosti 14,61 D. To představuje změnu optické mohutnosti v rozsahu 0 kV až 5 kV o 9,11 D. V případě dvojjvypuklé spojně čočky naplněné kapalinami s různými indexy lomu dosahuje optická mohutnost bez napětí 7,07 D a při napětí 5 kV optickou mohutnost 14,61 kV. Což představuje změnu optické mohutnosti v rozsahu napětí 0 kV až 5 kV o 7,54 D. Průběhy závislosti optické mohutnosti na napětí jsou pro vzorky spojných čoček se zásobníkem znázorněny na Obr. 33.

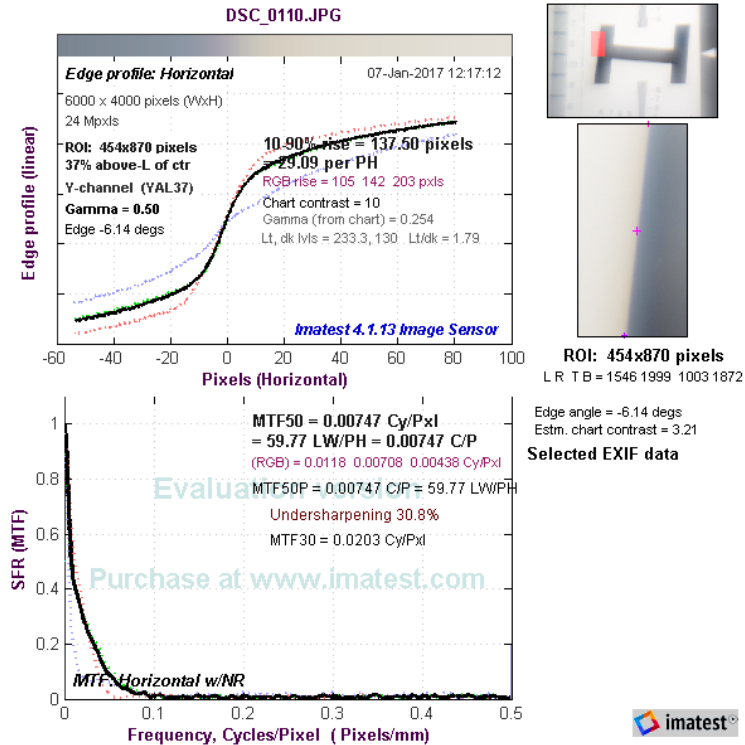


Obr. 33: Graf závislosti optické mohutnosti vzorků spojných membránových čoček se zásobníkem

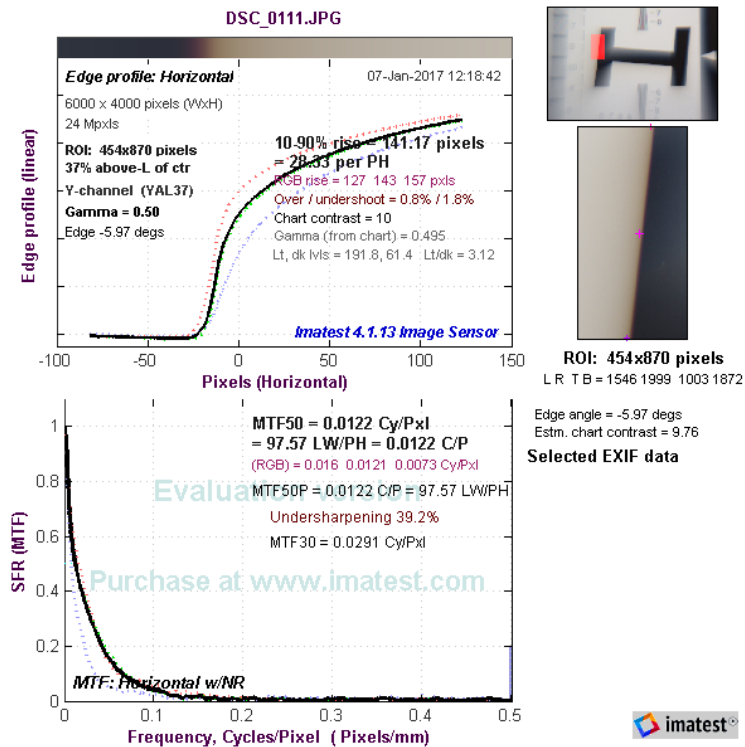
Také u tohoto typu čoček byly měřeny přenosové parametry. Konkrétně byl měřen vzorek ploskovypuklé spojně čočky naplněné 6 ml desetiprocentního roztoku NaCl. Na Obr. 34 je zobrazen výsledek měření přenosových parametrů z programu Imatest této čočky bez clony. Můžeme vidět, že obraz je neostrý a chybí mu kontrast. Délka přechodu hrany je v tomto případě 211,63 pixelů. Na Obr. 35 je zobrazen výsledek měření při použití clony o průměru 18mm. Z obrázku je patrné, že se zlepšil kontrast barev a také délka přechodu hrany klesla na hodnotu 137,5 pixelu. Při použití clony o průměru 10 mm se zlepšil kontrast, délka přechodu se téměř nezměnila. Nejlepší výsledky vyšli pro průměr clony 3 mm, obr. 37. Při tomto průměru clony je délka přechodu hrany 15 pixelů.



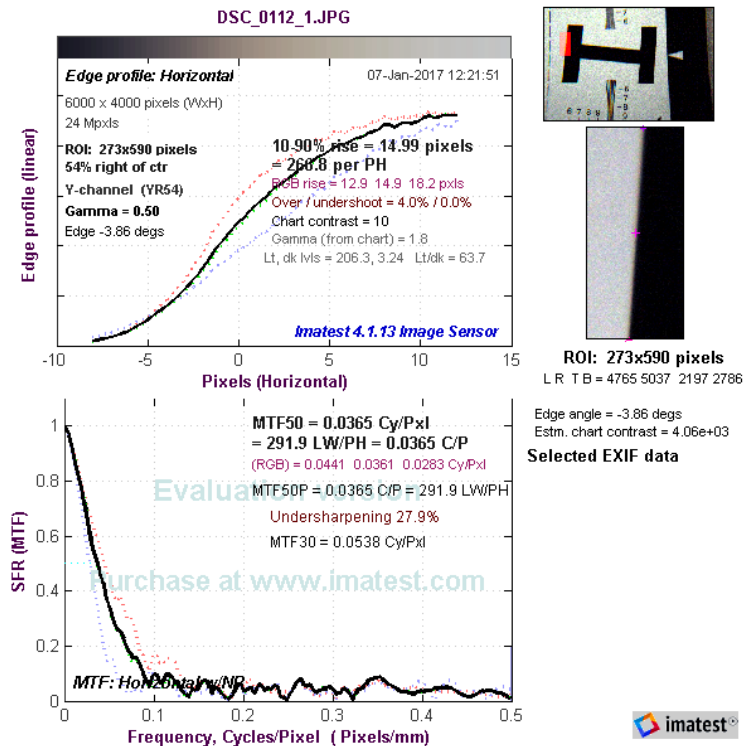
Obr. 34: Výsledek měření spojné čočky se zásobníkem naplněné 6 ml roztoku NaCl bez použití clony.



Obr. 35: Výsledek měření spojné čočky se zásobníkem naplněné 6 ml roztoku NaCl s použitím clony o průměru 18 mm.

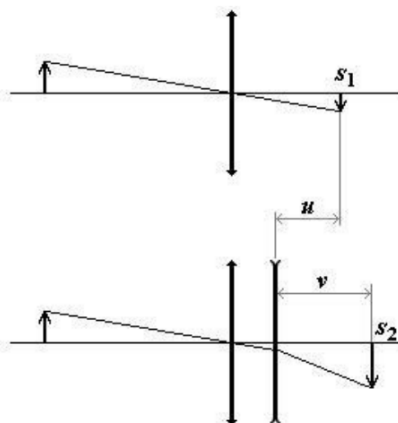


Obr. 36: Výsledek měření spojné čočky se zásobníkem naplněné 6 ml roztoku NaCl s použitím clony o průměru 10 mm.



Obr. 37: Výsledek měření spojné čočky se zásobníkem naplněné 6 ml roztoku NaCl s použitím clony o průměru 3 mm.

Z kategorie rozptylných membránových čoček se zásobníkem byly testovány dvě varianty. Ploskovydutá a dvojvydutá rozptylná čočka, obě naplněny 12 ml desetiprocentním solným roztokem. Závislost optické mohutnosti na napětí udávají následující tabulky. Optická mohutnost rozptylek byla měřena také přímou metodou. Protože obraz rozptylek je neskutečný, nelze použít metodu popsanou pro měření spojek. Metoda je modifikována tím, že před čočku se zařadí spojka. Ostrý obraz spojky je předmětem pro měřenou rozptylku, která vytvoří obraz v jiném místě. Modifikovaná metoda je znázorněna na Obr. 38.



Obr. 38: Metoda měření ohniskové vzdálenosti rozptylky. Převzato z [31]

Ohnisková vzdálenost rozptylky se pak vypočítá ze vztahu (24)

$$f = \frac{u \cdot v}{u - v} \quad (24)$$

kde u je vzdálenost umístění rozptylky od stínítka s ostrým obrazem spojky a v je vzdálenost rozptylky a stínítka s ostrým obrazem rozptylky.

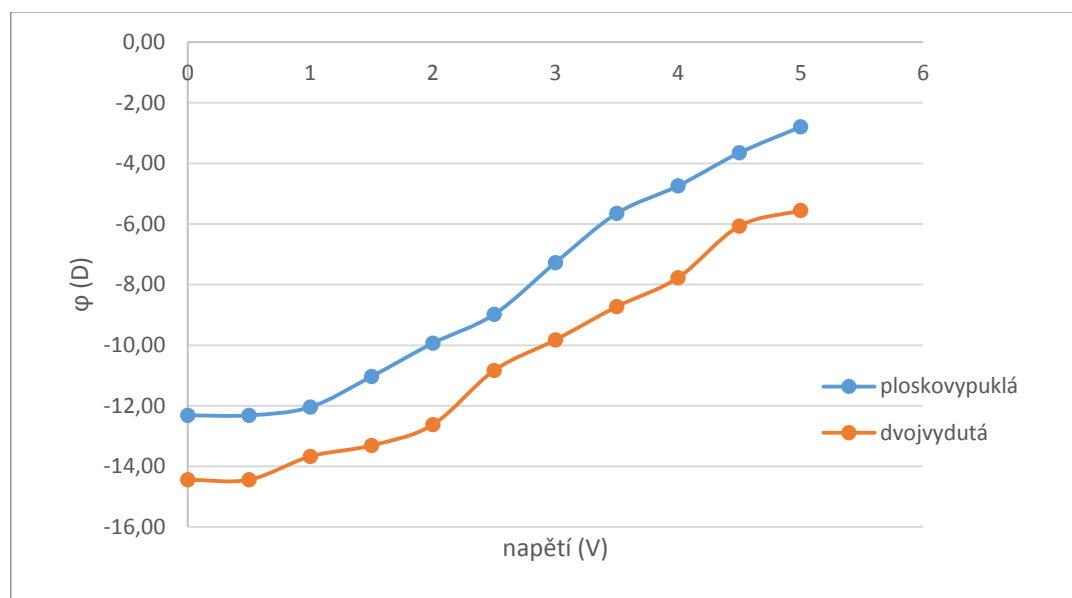
- Ploskovydutá rozptylka 12 ml

napětí (V)	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
v (cm)	6	6	6,1	6,5	7	7,5	8,6	10	11	12,5	14
f (cm)	-8,12	-8,12	-8,30	-9,06	-10,06	-11,13	-13,74	-17,69	-21,08	-27,38	-35,78
φ (D)	-12,32	-12,32	-12,05	-11,04	-9,94	-8,99	-7,28	-5,65	-4,74	-3,65	-2,80

- Dvojvydutá rozptylka 12 ml

napětí (V)	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
v (cm)	5	5	5,2	5,3	5,5	6,1	6,5	7	7,5	8,6	9
f (cm)	-6,92	-6,92	-7,31	-7,51	-7,92	-9,23	-10,17	-11,45	-12,86	-16,47	-18,00
φ (D)	-14,44	-14,44	-13,68	-13,31	-12,63	-10,84	-9,83	-8,73	-7,78	-6,07	-5,56

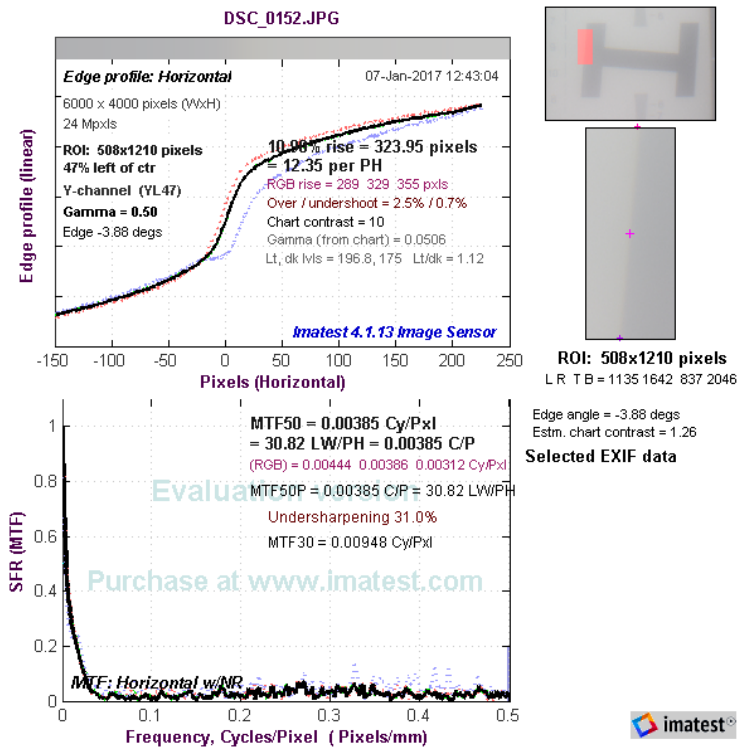
Měřením bylo zjištěno, že ploskovydatá rozptylná čočka naplněná 12 ml solného roztoku dosahuje bez napětí optické mohutnosti -12,32 D. Při plném napětí 5 kV dosahuje tato čočka optické mohutnosti -2,8 D. Optická mohutnost se u této čočky mění o 9,52 D. Dvojvydatá rozptylka naplněná stejným objemem kapaliny, dosahuje bez napětí optické mohutnosti -14,44 D a při napětí 5 kV mohutnosti -5,56 D. Optická mohutnost se mění o 8,88 D. Tato závislost optické mohutnosti na napětí je znázorněna na Obr. 39.



Obr. 39: Graf závislosti optické mohutnosti vzorků rozptylných membránových čoček se zásobníkem

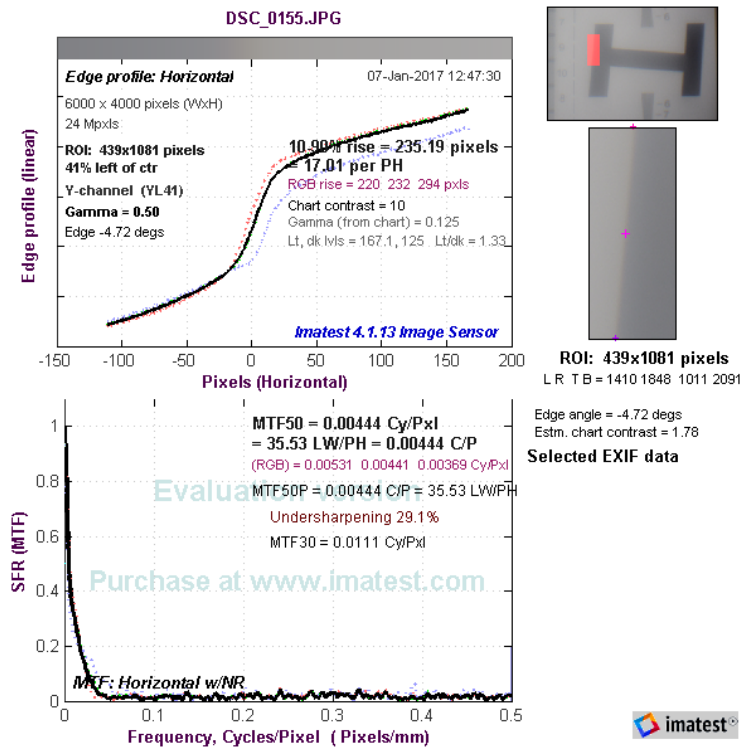
3.4.3 Soustava spojky a rozptylky

U předchozích výsledků měření je patrná sférická aberace, tu způsobuje kulový tvar čočky tím, že paprsky procházející krajem čočky se lámou více, než paprsky procházející blízko středu. Tento rozdíl jednotlivých ohnisek paprsků způsobuje neostrost obrazu. Tuto aberaci lze potlačit kombinací spojných a rozptylných čoček, protože u spojky se krajní paprsky lámou více, než ty u středu a u rozptylky je tomu přesně naopak, tím dochází k potlačení této vady. V této části bude ověřeno, zda lze tuto vadu odstranit použitím kapalinových čoček. Na Obr. 40 je znázorněn výsledek měření Imatestem pro soustavu složenou ze spojky a rozptylky



Obr. 40: Výsledek měření soustavy složené ze spojky a rozptylky bez použití clony.

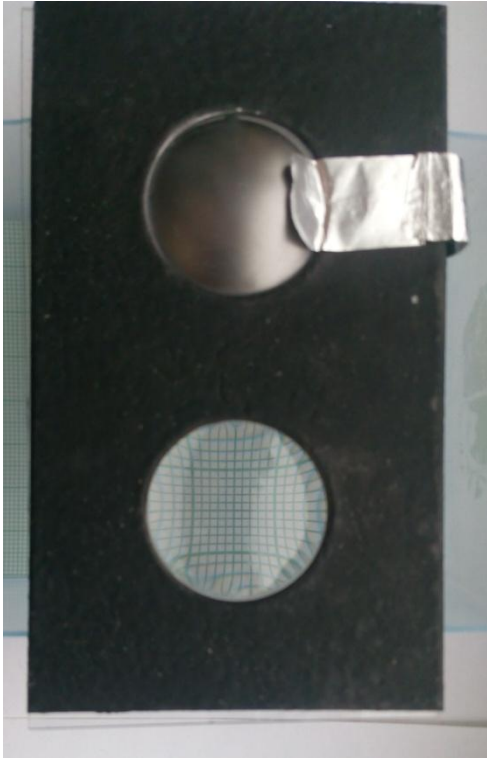
Jak je z obrázku patrné, vstupnímu obrázku chybí kontrast a je neostrý, délka přechodu hrany je poměrně velká, konkrétně 324 pixelů. Proto byla do soustavy zařazena clona, výsledky měření s použitou clonou o průměru 10 mm je znázorněn na Obr. 41. Je patrné, že použitím clony došlo k mírnému zlepšení kvality obrazu, délka přechodu hrany se zkrátila na 235,19 pixelu. Z měření vyplývá, že kombinací spojně a rozptylně čočky nelze odstranit sférickou aberaci.



Obr. 41: Výsledek měření soustavy složené ze spojky a rozptylky s použitím clony o průměru 10 mm

3.4.4 Odstranění zkreslení

Při zobrazení pravoúhlého rastru čočkou můžeme pozorovat zkreslení obrazu. Tato vada vzniká tím, že body vzdálenější od optické osy se zobrazují s různým zvětšením. Na Obr. 42 je zobrazeno poduškovité zkreslené ploskovypuklé čočky se zásobníkem. Soustava kapalinových čoček složená ze dvou ploskovypuklých čoček se společnou plochou stranou (poslední varianta na Obr. 31), umožňuje tuto vadu korigovat. Korekce spočívá ve vhodném nastavení poloměru křivosti jednotlivých čoček, tedy ve vhodně zvoleném objemu kapaliny. Na Obr. 43 je znázorněna kompenzace této vady použitím výše jmenované soustavy.



Obr. 42: Podušková vada u ploskovypuklé čočky



Obr. 43: Kompenzace poduškové vady soustavou

4 Závěr

Cíl mé diplomové práce byl seznámit se s problematikou čoček, optických soustav. Především o možnostech ovlivnění jejich optických vlastností. Na jejich základě navrhnout a realizovat několik vzorků optických soustav, kde budou jejich optické vlastnosti ovládány pomocí EAP. Tyto vzorky změřit, zjistit jejich vlastnosti a pokusit se minimalizovat optické aberace.

Po prostudování odborné literatury týkající se možností ovládní optické mohutnosti pomocí EAP bylo zjištěno, že tomuto požadavku nejvíce vyhovují kapalinové čočky. U kapalinových čoček lze dobře řídit optickou mohutnost čočky několika způsoby. V této práci byly zvoleny kapalinové membránové čočky. Kde se optická mohutnost řídí za pomoci vydouvání membrány množstvím kapaliny v soustavě. Základní princip membránové čočky byl ověřen v mé bakalářské práci, kde byly zkoumány různé druhy EAP a ověřeno, že lze EAP použít pro řízení optické mohutnosti čočky. Tento princip je v práci nazván jako membránové čočky se zásobníkem, kde se systém skládá ze dvou spojených komůrek naplněných vodivou kapalinou a kde stěny komůrky jsou realizovány elastickou membránou. Jedna komůrka tvoří samotnou čočku a druhá zásobník ovládaný EAP. Po připojení napětí dojde ke změně tvaru stěn zásobníku, část kapaliny je přemístěna do čočky a dojde ke změně tvaru čočky, a tím i optické mohutnosti. Pomocí tohoto principu lze vytvořit dvojevypuklou spojku, ploskovypuklou spojku, ale také při i vhodně zvolených rozměrech rámu soustavy rozptylku, buďto dvojevypuklou, nebo ploskovypuklou rozptylku. Další způsob, kterým lze ovlivnit parametry soustavy, je množství kapaliny a její index lomu. V práci byly měřeny optické mohutnosti několika vzorků, kdy se optická mohutnost měnila v rozsahu napětí od 0 V do 5 kV o jednotky dioptrií. Dalším navrženým typem soustavy je membránová čočka přímo ovládaná. Tato soustava má uprostřed kapalinovou membránovou čočku, která je ovládaná okolním EAP. Po připojení napětí okolní aktuátor napíná membránovou čočku. Tato soustava umožňuje vytvořit pouze spojně dvojevypuklé čočky, ale není zde třeba použít vodivou kapalinu. Další parametr, který byl u čoček zkoumán, je kvalita zobrazení, přítomnost optických aberací a možnost jejich omezení. Měřením bylo zjištěno, že přenos obrazu navrženými čočkami není kvalitní, obraz je neostrý. Potlačení neostrosti způsobené sférickou aberací bylo dosaženo použitím clony, která zacloní okraje čočky, kde dochází k této vadě. Dále bylo zkoumáno, zda se obraz zlepší kombinací spojky a rozptylky za sebou, jako v případě skleněných čoček. Měřením bylo zjištěno, že tato kombinace kapalných čoček v malé míře zlepší optické vlastnosti. Zkreslení obrazu lze u soustav kapalných čoček korigovat vhodnou volbou poloměru zakřivení jednotlivých optických ploch. Zjištěná špatná kvalita zobrazení je způsobena tím, že membrána čočky je vytvořena ze stejného materiálu, jako aktuátor, akrylátové pásky VHB 4910.

Měření potvrdilo předpoklad, že tento materiál nemá dobré optické vlastnosti a nelze vzniklé defekty odstranit. Možné vylepšení do budoucna by bylo, použít na membránu čočky jiný opticky kvalitnější materiál. Vhodný materiál na výrobu membrány čočky by mohl být PDMS (polydimetyloxan), který je také pružný a opticky transparentní.

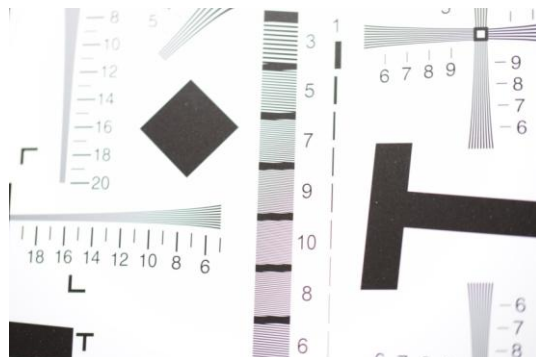
5 Literatura

- [1] Matějka, M.: *Elektricky nastavitelná optická mohutnost elastické čočky*. Praha: ČVUT 2014. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická.
- [2] Klein, M., V. - Furtak, T., E.: *Optics. 2nd edition, John Willey & Sons, 1986*. ISBN 3-540-18911-4
- [3] Klimeš, B., Kracík, J., Ženíšek, A.: *Základy fyziky II*. Praha: Academia, 1972.
- [4] Halliday, D., Resnick, R., Walker, J.: *Fyzika - Elektromagnetické vlny - Optika – Relativita*. Praha PROMETHEUS. ISBN 80-214-1868-0
- [5] Mikš, A.: *Aplikovaná optika*. Praha: ČVUT 2009. Skriptum. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.
- [6] Abramowitz, M., Fellers, T., Davidson, T.: *The Nature of Electromagnetic Radiation* [Online]. Dostupné z <http://olympus.magnet.fsu.edu/primer/lightandcolor/electromagintro.html> [cit. 2016-03-16]
- [7] Košťál, R.: *Optické soustavy*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství 1979. ISBN 14-482-79
- [8] Mikulčák, J. a kolektiv: *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství 1988.
- [9] Čočky -encyklopedie [online]. J. Reichl [cit. 2016-04-09]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/480-cocky>
- [10] Návod k laboratorní úloze, *Měření ohniskových vzdáleností čoček, optické soustavy*. Fakulta technologická, UTB ve Zlíně. Dostupné z http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_2/F2_lab_09.pdf [cit. 2016-05-12].
- [11] Mikš, A.: *Aplikovaná optika 10, Geometrická a vlnová optika*. Praha: ČVUT 2000. Skriptum. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.
- [12] Cvancigerová, G.: *Vady optického zobrazování*. Bakalářská práce, Lékařská fakulta Masarykovi university v Brně 2011. Dostupné z https://is.muni.cz/th/326376/lf_b/BAKALARKA.pdf
- [13] Článek *Refractive index of water* [online]. Dostupné z <http://www.philiplaven.com/p20.html> [cit. 2016-05-15]
- [14] Králová, M. *Světelný ostrov*, článek [online]. Dostupné z <http://edu.techmania.cz/cs/veda-v-pozadi/592>
- [15] Jančík, P. :*Optické materiály pro výrobu brýlových čoček*. Diplomová práce, Lékařská fakulta Masarykovi university, Brno 2006. Dostupné z is.muni.cz/th/143009/lf_m/Diplomova_prace.doc
- [16] Gross, H.: *Handbook of Optical Systems*, Wiley-VCH 2005. ISBN 3-527-40377-9

- [17] Kajnar, P.: *Čočky s proměnnou ohniskovou ohniskovou vzdálenost*. Fakulta strojní ČVUT v Praze 2009. Dostupné z <http://www1.fs.cvut.cz/cz/u12110/vyzkum/Trebon09/cd/PMO/Kaj.pdf> [cit. 2016-06-09].
- [18] Simon, E.: *A liquid lens with electro-optical focus and tilt control*. Článek [online] dostupné z <http://spie.org/newsroom/3491-a-liquid-lens-with-electro-optical-focus-and-tilt-control>
- [19] Liquid lens for auto focus (AF) [online] dostupné z <http://www.varioptic.com/technology/liquid-lens-autofocus-af/>
- [20] Produktový list Arctic 16F family [online]. Dostupné z <http://www.varioptic.com/products/variable-focus/arctic-16f/>
- [21] Mikš, A., Novák, P.: *Calculation of a surface shape of a pressure actuated membrane liquid lens*. Fakulta stavební ČVUT v Praze 2014.
- [22] Wilson, A.: *Tunable Optics*. [online] Dostupné z http://www.vision-systems.com/articles/print/volume-15/issue-7/Features/Tunable_Optics.html
- [23] Blum M, Büeler M, Grätzel C., Aschwanden M.: *Compact optical design solutions focus tunable lenses* [online]. Dostupné z <http://www.optotune.com/images/papers/110803%20Compact%20optical%20design%20solutions%20using%20focus%20tunable%20lenses.pdf>
- [24] Produktový list Holochip APL-1050 [online] dostupné z <http://www.holochip.com/pdf/APL-1050+Brochure.pdf>
- [25] Brochu, P. – Pei, Q.: *Advances in Dielectric Elastomers for Actuators and Artificial Muscles*. Macromolecular Rapid Communications. 2010. [cit. 2016-09-18]
- [26] Návod k laboratorní úloze: *Měření ohniskových vzdáleností tenkých čoček*. Pedagogická fakulta Jihočeské univerzity České Budějovice. Dostupné z http://home.pf.jcu.cz/~kriz/index.php?option=com_content&view=article&id=152:mereni4&catid=58:fpr4&Itemid=2
- [27] Digital Imaging [online] dostupné z http://www.danes-picta.com/txt_PhotoDigital.htm [cit. 2016-10-10]
- [28] Prajzler, V.: *Měření transmise vzorku VHB 4910*. Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze 2016
- [29] Havlín, J.: *Měření parametrů digitálních fotoaparátů*. Diplomová práce, fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze 2010
- [30] Imatest dokumentace: *Measure sharpness from slanted-edges in any image*. Dostupné z <http://www.imatest.com/support/modules/sfr/>
- [31] Návod k laboratorní úloze: *Měření ohniskové vzdálenosti čoček*. Technická univerzita v Liberci [online]. Dostupné z: https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/4903/mod_resource/content/3/%C4%8Co%C4%8Dky.pdf

6 Přílohy

6.1 Měření ESF objektivu Tamron



Obr. 1P: Snímek pořízený objektivem Tamron

6.2 Měření ESF dvojevypuklé spojné čočky přímo ovládané naplněné 6 ml vody



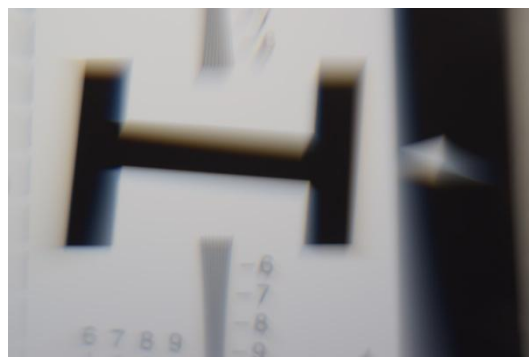
Obr. 2P: bez clony



Obr. 3P: clona 18 mm



Obr. 4P: clona 10 mm

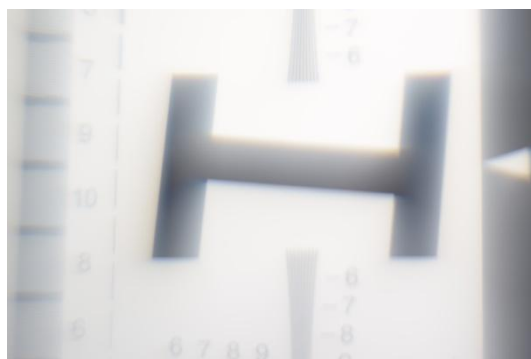


Obr. 5P: clona 5 mm

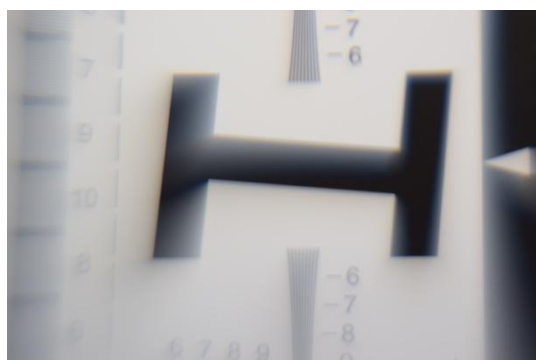
6.3 Měření ESF ploskovypuklé spojky se zásobníkem naplněné 6ml solného roztoku



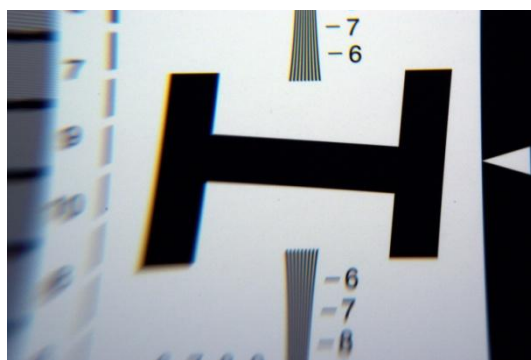
Obr. 6P: bez clony



Obr. 7P: clona 18 mm



Obr. 8P: clona 10 mm

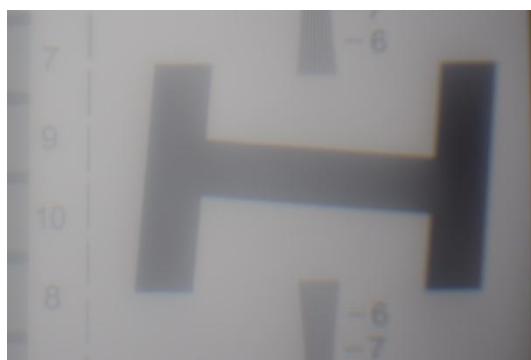


Obr. 9P: clona 3 mm

6.4 Měření ESF kombinace spojky a rozptylky



Obr. 10P: bez clony



Obr. 10P: clona 10 mm