

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2020

**JAN
SOUKAL**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Soukal** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **459981**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Přístrojová a řídicí technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Toleranční analýza potkávací funkce předního světlometu automobilu

Název diplomové práce anglicky:

Tolerance analysis of the low beam headlamp function

Pokyny pro vypracování:

- Zpracování rešerše technologických procesů výroby předních světlometů
- Rešerše o fotometrii v automotive
- Zpracování tolerančního řetězce potkávací funkce
- Návrh experimentu pro ověření výsledků ze simulace

Seznam doporučené literatury:

- [1] BUMBÁLEK J.: Základy technické optiky, ČVUT, 1987, 1988, 1990, 1995, 1997.
- [2] E/ECE/324 - E/ECE/TRANS/505/Rev.2/Add.111/Rev.2
- [3] KHAN, T. Q., P. BODROGI, Q. T. VINH a H. WINKLER. LED Lighting: Technology and Perception. 2015. ISBN 978-3-527-40933-4.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Bc. Šárka Němcová, Ph.D., odbor přesné mechaniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **27.08.2020**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Bc. Šárka Němcová, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

_____ podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci napsal samostatně a s použitím uvedené literatury a pramenů.

V Praze, dne 24. 8. 2020

.....

Jméno a příjmení

Poděkování

Chci poděkovat svým rodičům a sourozencům za podporu a zázemí během studia na vysoké škole. Děkuji vedoucí diplomové práce Ing. Bc. Šárce Němcové, Ph.D. za její ochotu, rady, připomínky a příjemnou atmosféru během studií i psaní. Také ji vděčím za to, že jsem se rozhodl studovat tak krásnou oblast fyziky, jakou optika je. Děkuji kolegům z oddělení EEL za všechny konzultace, rady a přijetí. Děkuji všem ostatním, kteří přispěli svými zkušenostmi, časem, povzbuzením a v neposlední řadě děkuji svým spolužákům a přátelům.

Anotační list

Jméno autora	Bc. Jan Soukal
Název práce	Toleranční analýza potkávací funkce předního světlometu automobilu
Anglický název	Tolerance analysis of the low beam headlamp function
Vedoucí práce	Ing. Bc. Šárka Němcová, Ph.D.
Rok	2020
Ústav	Ústav přístrojové a řídicí techniky
Obor	Přístrojová a řídicí technika – optomechanika

Bibliografické údaje	počet stran:	81
	počet obrázků:	47
	počet tabulek:	9
	počet příloh:	0

Klíčová slova	přední světlomet, potkávací funkce, reflektory, LED, toleranční analýza
Keywords	headlights, lowbeam function, reflectors, LED, tolerance analysis

Anotace Světelná mapa potkávací funkce automobilových světel podléhá předpisům, které musí být splněny. Na mapu však působí mnoho vlivů, které různou mírou způsobují změny distribuce světla. Tato diplomová práce zkoumá zdroje chyb v soustavě světlometu a citlivost některých z nich na nepřesnosti způsobené výrobou a konstrukcí. V kapitolách je nejen popsána výroba hlavních světlometů, přehled používaných zdrojů světla či fotometrie světel, ale i toleranční řetězec soustavy nebo deformace světelného svazku procházejícího optickou soustavou, která vzniká vychýlením zdroje světla. Získané poznatky tvoří vstupní data simulací provedených na základním reflektoru.

Abstract: Low beam headlamp function has to meet the required standards. However, there are a lot of influences on the lightmap that cause changes in the light distribution. This diploma thesis examines the sources of errors in the headlight system and the sensitivity of those inaccuracies caused by production and construction. The chapters describe not only output of headlamps, a summary of the light sources and the light measurement process, but also the tolerance chain of system or diagrams of light beam passing through the optical system that is caused by the deflection of the light source. Obtained information create the input data of simulations on the primary reflector.

Seznam zkratek

LED	Light-Emitting Diode
LEGO	leg godt
PCB	Printed circuit board
SMD	surface mount device
THD	through hole device
PC	polykarbonát
PMMA	polymethylmethakrylát
ABS	akrylonitrilbutadienstyren
UV	ultrafialové záření
VIS	viditelná oblast záření

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Konstrukční materiál	11
2.1	Termoplasty.....	12
2.2	Reaktoplasty (Termosety)	13
2.3	Elastomery	13
2.4	Výroba.....	13
2.5	Vlastnosti polymerů.....	14
2.5.1	Navlhavost polymerů	14
2.5.2	Tepelné vlastnosti polymerů.....	14
2.5.3	Stárnutí polymerů.....	15
2.6	Materiály v automotive	16
2.6.1	PC – polykarbonát.....	16
2.6.2	PMMA – polymethylmethakrylát.....	16
2.6.3	ABS – Akrylonitrilbutadienstyren	16
2.7	Technologie zpracování plastů.....	17
2.7.1	Vstřikování	17
2.8	Shrnutí	25
2.9	Výroba tenkých vrstev.....	26
3	Konstrukce hlavního světlometu.....	28
3.1	Funkční prvky	28
3.2	Dekorační prvky.....	29
3.3	Plášť	29
4	Světelné zdroje	30
4.1	Teplotní zdroje světla	30
4.2	Fotoluminiscenční zdroje světla	31
4.3	Elektroluminiscenční zdroje světla	33
4.3.1	Výroba	34
4.3.2	Binning.....	34
4.3.3	Klasifikace dle teploty chromatičnosti	35
4.3.4	Klasifikace dle napájecího napětí.....	36
4.3.5	Klasifikace dle světelného toku	36
4.3.6	Osazování plošných spojů.....	37

4.4	Chemoluminiscence	38
4.5	Kvantové zdroje	38
4.6	Spektrální a prostorové charakteristiky zdrojů světla	40
5	Fotometrie	42
6	Optická analýza	48
6.1	Deformace světelného svazku vlivem špatné pozice zdroje světla	48
6.2	Citlivost optického systému na velikost ohniskové vzdálenosti	50
6.3	Matematický popis	51
6.4	Parabolický reflektor	54
6.4.1	Úhlová citlivost paraboly	55
7	Toleranční řetězec reflektorového světloometu	57
7.1	Měření pozice LED čipů	59
7.2	Usazení LED vůči reflektoru	61
7.3	Součet chyb	61
8	Simulace	63
8.1	BOD 75R	65
8.2	BOD 50L	65
8.3	BOD 25R	66
8.4	BOD HV	67
8.5	OBLAST ZIII	67
8.6	Shrnutí	68
9	Návrh experimentu	69
9.1	První přístup	69
9.2	Druhý přístup	72
9.3	Zhodnocení	73
10	Závěr	74
11	Použitá literatura	76
12	Seznam obrázků	80

1 Úvod

Automobilový průmysl je velice dynamický obor, který musí reagovat na požadavky uživatelů, nabízet atraktivní řešení a držet krok s konkurencí. Spojuje téměř celou paletu strojírenských oborů, které se v dnešní době neobejdou bez mezioborové spolupráce. Debaty se nevedou pouze o emisních normách, ale nové koncepce si žádají nová řešení. Tím, že je naše země průmyslově orientována, řadí se Česká republika ke světovým velmocem ve výrobě automobilů. Firem, které jsou zaměřené na tyto produkty, je celá řada. [1]

Přední světlomety, které procházejí za posledních pár let masivní revolucí, stále zůstávají nezbytnou a zajímavou částí, která dává automobilu ojedinělý vzhled a duši. Často bývají základním poznávacím znamením dané značky a dovolím si tvrdit, že tím úplně prvním, čeho si laik všimne. Není proto divu, že se této části vnějšího vzhledu vozu věnuje taková pozornost. Také je snaha propojovat funkce jiných dílů právě se světlometry nebo do nich tyto funkce úplně implementovat.

Současný trend osvětlení směřuje k nahrazení klasických žárovek či výbojek výkonnější LED technologií. To s sebou přináší možnosti a potenciál, o kterých se při použití žárovek ani nezdálo. Nejen že se zvyšuje vyzařovaný světelný tok, a tím vyšší intenzita osvětlení vozovky, lepší homogenita, možnost nových designových prvků, jako například použití světlovodů, nastavitelná chromatičnost zdroje, ale také se může uvažovat o animaci některých funkcí, nebo dokonce o pokročilých systémech aktivních dálkových funkcí Matrix-LED. Cenou za tyto výhody je komplikovanost řešení oproti reflektorovým soustavám se žárovkami a jiné aspekty, které se dříve řešit nemusely.

Jednou z věcí, které se změnilo, je velikost zdroje. V současnosti používané LED čipy jsou malé, proto na výslednou světelnou distribuci bude mít o to více vliv přesnost, respektive nepřesnost, vzájemné polohy zdrojů a použité optické soustavy. S jakou přesností jsme schopni zajistit výrobu jednotlivých dílů? Jak reaguje celá soustava na různé nepřesnosti? Kde je potřeba při návrhu soustředit nejvíce pozornosti, čeho se vyvarovat a na co předepsat přísnější výrobní požadavky na přesnost? Na tyto otázky se chci ve své práci zaměřit. Experimentální část bude opřena o proměření reálných dílů a provedenou simulaci v programu LucidShape.

V první části se budu věnovat novodobé konstrukci světlometu a pokusím se popsat tuto složitou soustavu. Zaměřím se na využívané optické systémy. Poté se budu věnovat jednotlivým výrobním technologiím, na jakých parametrech závisí nebo jaké přesnosti lze

dosáhnout. Protože se téměř vše vyrábí z plastu, pozornost zaměřím na vstřikování do forem. Další téma věnuji světelným zdrojům a osazování plošných spojů.

Součástí této práce je také simulace a zhodnocení jevů v celkové světlené mapě, které jsou způsobeny přítomnými nepřesnostmi. A v poslední kapitole navrhuji experiment, který by tyto výpočty potvrdil.

2 Konstrukční materiál

V současné době jsou v naprosté většině dílů světloometu použity plastové materiály, které se používají nejen na tělo světloometu (které je také označováno jako „housing“), ale i pro čočky optických soustav, krycí skla nebo vnitřní chladičové systémy.

Plastem obecně nazýváme soubor syntetických nebo polosyntetických polymerních materiálů. Polymery jsou tvořené dlouhými řetězci opakujících se základních molekul (merů), které vznikají během chemické reakce zvané polymerace. Především se jedná o organické látky. Polymerace může probíhat několika různými mechanismy, ale vždy má 3 fáze. V první se přivedením energie uvolní některé vazby monomeru. Této fázi se říká iniciace. Dále následuje spojování monomerů v místech jejich rozdělení a vzniká dlouhý řetězec za vzniku reakčního tepla. Tomuto procesu říkáme propagace. Během poslední fáze – terminace – se ukončuje reakce a vytvořený řetězec přestává růst.

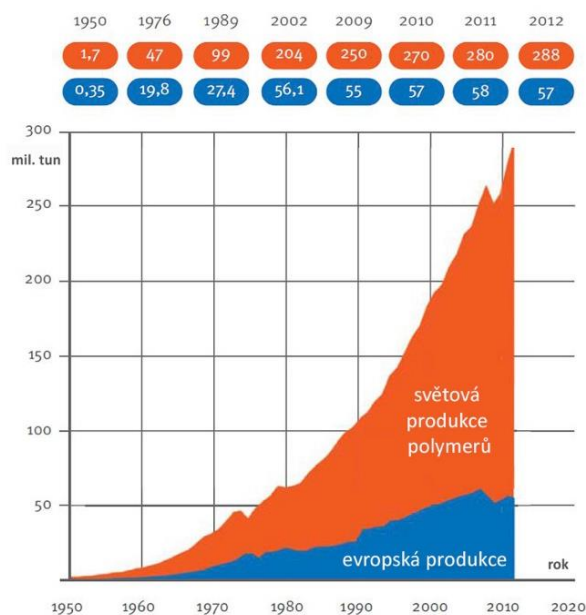
Kvůli své stavebnicové struktuře vykazují polymery specifické vlastnosti, díky nimž se dostaly do téměř všech oblastí lidského života. Použití čistých polymerů není pro jejich vlastnosti tak rozšířené. Přidávají se do nich různé přísady, nebo materiály, které zásadně mění výsledné vlastnosti. Mohou to být stabilizátory, barviva, změkčovadla, maziva, antistatika nebo nadouvadla.

Čistota produktů vstupujících do polymerace také ovlivňuje kvalitu výrobků. Musí se dohlížet na obsah některých prvků, které pozitivně, ale i negativně mění vlastnosti produktu. Nejčastěji se udávají uhlík, vodík, kyslík, dusík, chlor, síra a křemík.

Vlastnosti polymerů jsou rozdílné v závislosti na druhu materiálu. Mezi pozitivní vlastnosti řadíme malou hustotu, a tedy s ní spojenou nízkou hmotnost výrobku. Plasty také vykazují chemickou a korozní odolnost, izolační vlastnosti (zvukové, elektrické, tepelné). Druhá strana mince představuje i určitá negativa. Například velikou tepelnou roztažnost, stálost (obtížná recyklace), měkký povrch, některé plasty vystavené záření degradují nebo jsou hořlavé.

Polymery můžeme dělit dle několika kritérií, například dle chemického složení, podle chemické reakce, kterou vznikly, dle výchozí suroviny nebo dle chování za zvýšených teplot. Poslední dělení bývá nejčastější a podle něj dělíme polymery na termoplasty, reaktoplasty a elastomery. Všechny tyto tři skupiny budou popsány později.

Historie polymerů sahá do poloviny 19. století s tím, že největší rozmach začal až ve století 20. a jejich produkce každoročně narůstá, jak je patrné na Obrázek 1.



Obrázek 1 – Graf vývoje produkce plastů v čase [2]

2.1 Termoplasty

Je to nejpočetnější skupina, do které spadá asi 75 % polymerů. Mají teplotní mez, po které začínají měknout. Ta se pohybuje v rozmezí 40–80 °C a závisí na konkrétním materiálu. Pokud budeme materiál déle zahřívat, dosáhneme teploty tání, která je kolem 250 °C. Nelze ji však stanovit přesně, protože polymer je složen z různě velikých molekul, které přecházejí do tekutého stavu při různých teplotách. Jejich hlavní předností je tedy to, že jsou dobře zpracovatelné, a to buď technologií odlévání, nebo lisování. A protože je lze opakovaně uvést do tekutého stavu, je možná jejich recyklace.

Hlavními představiteli této skupiny jsou: PE (polyetylen), PP (polypropylen), PS (polystyren), PVC (polyvinylchlorid), PET (polyethylentereftalát).

Protože se v průmyslu nejvíce pracuje právě s termoplasty, neuvedu-li jinak, budu pojmem plast označovat termoplasty.

2.2 Reaktoplasty (Termosety)

U těchto materiálů dochází při zvýšení teploty oproti termoplastům k procesu, který nazýváme vytvrzování. Při zahřátí materiál měkne a chemickou reakcí dochází k následnému prostorovému zesítnění struktury makromolekul. Takto vytvrzené reaktoplasty nelze teplem dostat zpět do plastického stavu, jsou netavitelné a nerozpustné. Také vykazují značně vyšší chemickou, tepelnou i mechanickou odolnost. Produkty v nevytvrzeném stavu většinou označujeme jako pryskyřice a k chemické reakci nejčastěji kromě zvýšení teploty používáme ještě katalyzátor (tvrdidlo).

Termosety dělíme na fenoplasty, aminoplasty, epoxidy, polyestery a polyuretany.

2.3 Elastomery

Bývají označovány také jako kaučuky či pryže. Jejich přední vlastností je pružnost. Poměrná deformace může dosáhnout až hodnoty 5 a po zatížení se vrací zpět do původní polohy bez plastické deformace. Při zvýšené teplotě se míra její elasticity nemění.

Elastomery vznikají během procesu, kterému říkáme vulkanizace. Za zvýšených teplot a přítomnosti katalyzátoru (např. síry) se vytvářejí v materiálu mezi makromolekulami prostorové vazby. Stejně jako u reaktoplastů neleze tento stav materiálu zvýšenými teplotami změnit.

Hlavními představiteli jsou IIR (butylkaučuk), SR (polysulfidový kaučuk), PUR (polyuretanový kaučuk).

2.4 Výroba

Výrobu polymerů můžeme rozdělit na dvě větve – z přírodních látek nebo z látek vyráběných synteticky. Zatímco přírodní zdroje byly známy již od patnáctého století, v současné době převažují synteticky vyráběné polymery.

Přírodní kaučuk se získává ze stromu kaučukovníku brazilského. Naříznutím jeho kůry z něho vytéká látka, která se dále musí tzv. srazit (například kyselinou mravenčí). Dále se pere ve vodě a suší. Přidáním aditiv vzniká směs, ze které poté vulkanizací vzniká pryž.

Syntetické polymery se vyrábějí z uhlovodíků (ropa, zemní plyn) nebo z jejich derivátů chemickou reakcí polymerací, polykondenzací nebo polyadící. Výsledný produkt je ale většinou ve formě granulátu, který již obsahuje různá aditiva.

2.5 Vlastnosti polymerů

Nyní se zaměříme na některé vlastnosti polymerů.

2.5.1 Navlhavost polymerů

Navlhavost materiálů je schopnost látek přijímat vlhkost z okolního vzduchu. Tento proces je dlouhodobý a probíhá až do té doby, než nastane tzv. rovnovážný stav, při kterém se vlhkost materiálu vyrovná s hodnotou relativní vlhkosti vzduchu. Doba navlhání závisí na relativní vlhkosti a teplotě okolního vzduchu, chemickém složení polymeru a jeho tloušťce.

Příčinou tohoto procesu je chemicko-fyzikální podstata materiálu. Polymery obsahující prvky s velkou elektronegativitou (O_2 , N_2 , Cl_2 , ...) přijímají vlhkost snáze. Velký vliv mají také přítomná aditiva, jejich množství a vlastnosti. Organická aditiva zvyšují navlhavost, naopak aditiva anorganická navlhavost snižují. Mezi organické, založené na bázi celulózy, patří např. bavlna, dřevitá moučka, vlákna kokosu. Jako anorganická plniva se používají skleněná vlákna nebo drcený křemen.

Důsledkem navlhání polymerů je změna materiálových vlastností. Snižuje se mez pevnosti, Youngův modul pružnosti, zhoršují se elektroizolační vlastnosti a také se mění výsledný rozměr výrobku.

Při výrobě vstřikovaných dílů se používá materiál zbavený absorbované vlhkosti (<0,2 % hm.), proto se vlastnosti dílů určují až po jisté době, která je nazývána kondicionací – dosáhnutím rovnovážného stavu.[2]

2.5.2 Tepelné vlastnosti polymerů

Polymery představují materiál, jehož vlastnosti do jisté míry závisí právě na teplotě. Teplotní rozsah použitelnosti se liší od druhu polymeru. Termoplasty oproti reaktoplastům a elastomerům vykazují za zvýšených teplot výraznou změnu fyzikálních vlastností. Pro amorfní termoplasty je důležitá hodnota teploty skelného přechodu, po které následuje samovolná deformace součásti. U semi-krystalických se udává teplota tání.

Působením vyšších teplot také dochází k degradaci materiálu. Je to nevratný proces, který se dělí na 3 základní schémata – depolymerace, destrukce, degradační síťování. Zesíťované polymery degradují jako pevné látky, zatímco u termoplastů dochází k degradaci až při teplotě vyšší, než je přechod do kapalného stavu. Depolymerace

znamená štěpení polymerů na nízkomolekulární strukturu. Při destrukci dochází k odštěpování částí molekulárního řetězce (např. voda, chlorovodík, ...), a tím ke změně chemického složení. Degradační síťování vzniká např. při tepelném stárnutí. [2]

Teplotní roztažnost plastů patří k těm nejzákladnějším vlastnostem, které je třeba znát. Je závislá na struktuře, přidaných aditivech a také na orientaci makromolekul.

Tabulka 1 – Tabulka teplotní roztažnosti elastomerů [2]

MATERIÁL	DRUH POLYMERU	SOUČINITEL TEPLTNÍ ROZTAŽNOSTI α [K^{-1}]
PP (polypropylen)	termoplast	$(15 \div 18) \cdot 10^{-5}$
EP (epoxidová pryskyřice)	termoset	$(1 \div 4) \cdot 10^{-5}$
NR (přírodní kaučuk)	vulkanizovaný elastomer	$(20 \div 40) \cdot 10^{-5}$

2.5.3 Stárnutí polymerů

Polymery vykazují změnu vlastností způsobenou vlivem vnějšího prostředí. Tomuto ději se říká stárnutí polymerů. Podléhají mu všechny polymery, i když k různým vlivům mohou být různě odolné. Nejčastěji se stárnutí nejprve projevuje změnou barvy, průhlednosti, ztrátou lesku, narušením povrchu. To má za následek změnu mechanických vlastností. Působením prostředí se rozkládají makromolekuly, které díky své velikosti mohou dále reagovat s okolními látkami. Naruší se soudržnost, vznikají prasklinky a tento proces postupuje do celého objemu.

Jako nejčastější vlivy se uvádějí UV záření, kyslík, ozón, voda, teplo, atmosférické nečistoty a mikroorganismy. [2]

2.6 Materiály v automotive

Mezi základní polymerní materiály, které se v automotive používají, patří:

- polykarbonát (PC);
- polymethylmethakrylát (PMMA) / (HT);
- akrylonitrilbutadienstyren (ABS);
- teplotně odolný polykarbonát (PC-HT).

2.6.1 PC – polykarbonát

Polykarbonát je čirý technický plast s výbornými optickými a mechanickými vlastnostmi. Lze ho zpracovávat tepelným tvarováním za teplot 170–200 °C, lepit i svařovat (nejčastěji ultrazvukem). PC bez jakékoliv povrchové ochrany je velice nestabilní na UV záření. Proto se musí opatřit ochrannou vrstvou.

V praxi často nahrazuje sklo, protože je o 50 % lehčí. Použití je velice široké a to např. jako krytové desky venkovních zastřešení, ale také v optických soustavách. Index lomu je $n = 1,5886$. [4][5]

Velikost smrštění polykarbonátu se pohybuje v rozmezí 0,6–0,75 %.

2.6.2 PMMA – polymethylmethakrylát

Polymethylmethakrylát, též nazývaný plexisklo, je materiál, který je velice často používán právě pro osvětlovací nebo zobrazovací soustavy. Vykazuje velice dobré optické i mechanické vlastnosti, je odolný proti vnějším vlivům s výbornou kvalitou povrchu a odolností proti poškrábání. Index lomu PMMA je $n = 1,491$. Patří do termoplastů, kterým nevádí dlouhodobé teplotní namáhání do teplot 70 °C. Tvarování za tepla lze velice snadno, přičemž teplota závisí na molární hmotnosti a pohybuje se v rozmezí 150–180 °C.

Tvorba tenkých vrstev na PMMA je dobrá, a to i bez předchozí povrchové úpravy. Vrstvy vyráběné lakováním i vakuovým napařováním drží tak dobře, že je možné tento materiál tepelně tvarovat i s tenkou vrstvou. Mezi hlavní nevýhody materiálu patří jeho dobrá hořlavost a náchylnost k lomu při nárazu. [6]

Udávaná hodnota smrštění je 0,2–0,7 %.

2.6.3 ABS – Akrylonitrilbutadienstyren

Akrylonitrilbutadienstyren je technický polymer, který je velice odolný proti mechanickému namáhání a proti tlakovým rázům. Mezi jeho přednosti patří to, že je

recyklovatelný a zdravotně nezávadný. Vyniká též chemickou odolností proti vlivům vody, kyselin, louhů či olejů. Lze tepelně tvarovat, a dokonce i lepit lepidly na bázi rozpouštědel. Pro tyto vlastnosti se uplatňuje v celé řadě běžných aplikací kolem nás. Vyrábějí se z něho kojenecké lahve, hudební nástroje nebo díly oblíbené dětské stavebnice LEGO. [7]

Velikost smrštění se udává v intervalu 0,4–0,7 %. [8]

Tabulka 2 – Přehled vlastností používaných materiálů v automotive [3]

MATERIÁL	MAX. TEPLOTA [°C]	SOUČINITEL TEPLOTNÍ ROZTAŽNOSTI α [K^{-1}]
PC	120	$70,2 \cdot 10^{-6}$
PMMA	90–120	$80 \cdot 10^{-6}$
ABS	70–85	$73,8 \cdot 10^{-6}$
PC-HT	160–200	$70,2 \cdot 10^{-6}$

2.7 Technologie zpracování plastů

Během doby, co lidstvo začalo zkoumat a využívat tento druh materiálu, se rozvinulo mnoho technologií pro práci s ním. Volba vhodného technologického procesu závisí na faktorech, mezi které patří jak zpracováváný materiál, velikost a tvar vyráběné součásti, požadavky na přesnost, tak i ekonomický pohled na výrobu. Správnou volbu nelze stanovit letným pohledem na zadaný problém. Musí být podložena úvahou, která bude respektovat všechny možné aspekty.

Mezi ty nejběžnější patří lisování, vstřikování, vytlačování, vyfukování a válcování.

Pro sériovou výrobu se v dnešní době výhradně používají technologie lisování a vstřikování do forem.

2.7.1 Vstřikování

Technologie vstřikování je nejrozšířenější technologií výroby plastových výrobků. Vychází z vysokotlakového lití, používají se ale výrazně odlišné technologické parametry. Tímto zpracováním lze vyrábět už přímo hotové výrobky s velice dobrou kvalitou povrchu, požadovaným tvarem a s vysokou opakovatelností. Také vykazuje krátký pracovní cyklus, čímž je tento proces vhodný pro velkosériovou a hromadnou výrobu.

Vstřikováním lze vyrábět díly jak z termoplastů, termoplastických elastomerů, polymerních směsí, tak i z reaktoplastů. Velikost vyráběné součásti zpravidla

nepředstavuje omezení této technologie. Lze vstříkovat výrobky o hmotnosti od desetin gramu po několika kilogramové díly. [9]



Obrázek 2 – Horizontální hydraulický vstřikolis [10]

2.7.1.1 Princip vstřikování

Vstřikování je proces, během kterého se materiál ve formě taveniny dopravuje pomocí pístového, nebo šnekového mechanismu do dutiny ve formě. Zde dochází k odvodu tepla a tím ke ztuhnutí dílu. Vstupní látkou je materiál nejčastěji ve formě granulátu, do kterého se může přidávat i část recyklátu daného materiálu.

Směs se sype do násypky, je unášena šnekem nebo pístem do plastikační (tavící) komory. Zde se vlivem zvýšené teploty roztaví. Tavenina je šnekovým či pístovým mechanismem dopravena do dutiny formy, kde zaplní celý objem. Nastává dotlaková fáze, kdy se zvýší tlak ve formě, aby se co nejvíce kompenzovala teplotní změna rozměru. K tomu je ale potřeba mít k dispozici více roztaveného materiálu. Tomuto objemu se říká polštář a jeho standartní velikost bývá 5–15 % objemu dílu. Poslední pracovní fází procesu je vyjmutí hotového dílu z formy, kterému se říká výstřik.

Pokud porovnáme použití pístového a šnekového mechanismu, lépe nám vychází šnek. Díky němu můžeme zvýšit výkonnost výroby, dosáhnout vyššího vstřikovacího tlaku, a tím zmenšit smrštění, dosáhnout lepší homogenity výsledného materiálu.

Na kvalitu finálního výrobku, se kterou se pojí i mechanické a fyzikální vlastnosti, má vliv mnoho faktorů. Vedle druhu plastu ji také výrazně ovlivňují technologické parametry, konstrukce výstřiku, konstrukce formy a druh stroje. [11] [13]

Z hlediska druhu plastu hrají roli tyto parametry:

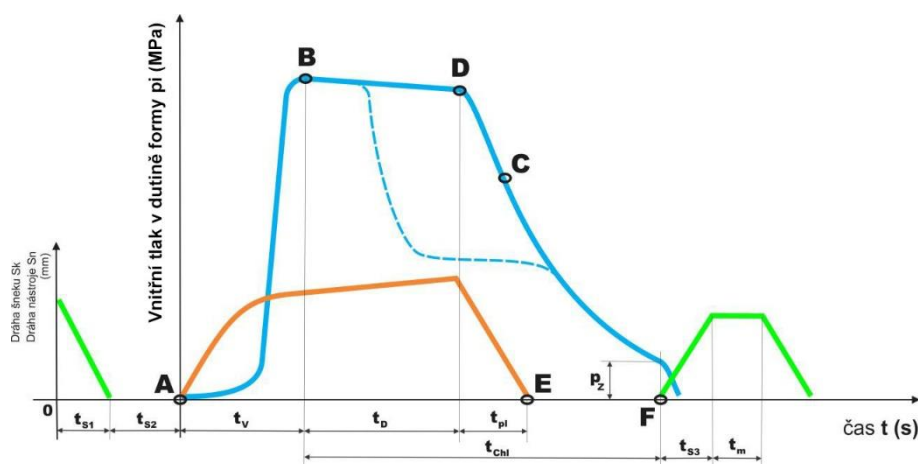
- rychlost plastikace materiálu – čím vyšší, tím lepší;
- tekutost materiálu – nesmí se s teplotou příliš měnit, hlavně kolem technologických parametrů;

- tepelná stabilita – v co největším rozsahu;
- uvolňování těkavých látek;
- velikost vnitřního pnutí;
- velikost smrštění oproti formě – v různých směrech může být odlišná (natočení makromolekul).

Vliv technologických parametrů na výstřik:

- vstřikovací tlak;
- teplota taveniny;
- teplota formy;
- rychlost plnění dutiny;
- doba a velikost dotlaku. [11]

Některé technologické parametry a jejich časové průběhy jsou uvedeny na Obrázek 3.



Obrázek 3 – Průběh tlaku (světle modrá), pohybu šneku (hnědá) a formy (zelená) během procesu vstřikování

Během samotného vstřikování probíhá celá řada procesů, které probíhají v materiálu jak při plnění v dutině formy (orientace makromolekul, pokles teploty a tlaku), tak i po vstřiknutí (krystalizace, deformace, smrštění). Pro stanovení tolerančního řetězce nás nejvíce budou zajímat faktory ovlivňující výsledný rozměr dílu.

Prvním vlivem je navlhavost a nasákavost. To je vlastnost materiálu absorbovat vodu. Vstupní granulát do technologie vstřikování vstupuje v ideálním případě s nulovou vlhkostí. Po vstřiknutí je výstřik vystaven vzdušné vlhkosti, která se snaží vyrovnat hladiny koncentrací. Vlivem toho se rozměr výstřiku zvyšuje v závislosti na velikosti míry navlhavosti daného materiálu a relativní vlhkosti okolního vzduchu.

Každý materiál vykazuje závislost svého rozměru na teplotě a není tomu jinak ani u plastů. Ba naopak. Plasty obecně mají násobně vyšší součinitel teplotní roztažnosti než třeba kovy. Změna rozměru se řídí vzorcem:

$$\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta t \quad (1)$$

kde $\alpha [K^{-1}]$ je součinitel teplotní roztažnosti, $l_0[m]$ je rozměr při teplotě t_0 a $\Delta t [^\circ C]$ je rozdíl teplot t_0 a t_1 .

Tepelná rozpínavost má zase za následek vnitřní deformaci, která může výstřik zkroutit. Výše popsané procesy lze sloučit a nazvat je jako smrštění.

2.7.1.2 Smrštění

Smrštění představuje objemovou změnu výstřiku při vyjmutí dílu z formy. Ta vzniká důsledkem změny teploty při konstantním tlaku. Vždy záleží na konkrétní konstrukci, umístění vtokové soustavy, materiálu a pracovních teplotách. Smrštění se ještě dělí na výrobní a na dodatečné. Výrobní smrštění představuje změny rozměrů do 24 h od vyjmutí z formy. V této době se vyrovnává teplota výstřiku s okolím nebo jeho vlhkost s relativní vlhkostí vzduchu. Po uplynutí této doby může v materiálu docházet ještě k sekundární krystalizaci nebo relaxaci vnitřního napětí; toto smrštění je označováno jako dodatečné smrštění. Průměrná hodnota smrštění se pohybuje řádově v jednotkách procent. Smrštění se počítá podle vzorce:

$$S = \frac{X_f - X_v}{X_f} \cdot 100 \% \quad (2)$$

kde X_f je rozměr v dutině formy (při teplotě $23^\circ C$), X_v je rozměr výrobku při teplotě $23^\circ C$. Ze vztahu je zřejmé, že se jedná o smrštění délkové. Aby bylo zaručeno, že je výstřik dokonale zchlazený, měří se smrštění v rozmezí od 24 do 48 hodin po vyrobení, přičemž výrobek je po tuto dobu uložen ve standardním prostředí, tj. při teplotě $23 \pm 2^\circ C$ a relativní vlhkosti vzduchu $50 \pm 5\%$. Při teplotě $23^\circ C$ se měří rozměry výstřiku i formy bez ohledu na to, jakou provozní teplotu má forma při vlastním vstřikováním. [12]

2.7.1.3 Předepisování tolerancí

Pro předepisování tolerancí plastových dílů slouží norma DIN 16901. Přehled velikostí tolerančních polí je uveden v Tabulka 3. Rozdělují se jednak podle požadované přesnosti, jednak podle typu rozměru. Rozměry jsou pojmenovány A a B.

Rozměry typu A jsou míry, které nepřímo souvisí s proporcemi formy, tedy rozměry vzniklé dosednutím částí formy nebo pohyblivými částmi formy (např. tloušťka dílu).

Typ B označuje rozměry, které přímo souvisí s tvarem formy (např. vnější, vnitřní rozměry).

Tabulka 3 – Předepisování tolerancí dle normy DIN 16 901

Třída přesnosti	Typ rozměru	Nominální rozměr										
		0-1	1-3	3-6	6-10	10-15	15-22	22-30	30-40	40-53	53-70	70-90
Extra přesný	A	0,10	0,12	0,14	0,16	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,31	0,35
	B	0,05	0,06	0,07	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,21	0,25
110	A	0,18	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	0,36	0,40	0,44
	B	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,26	0,30	0,34
120	A	0,32	0,34	0,36	0,38	0,40	0,42	0,46	0,50	0,56	0,60	0,68
	B	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,26	0,30	0,36	0,40	0,48
130	A	0,36	0,38	0,40	0,42	0,46	0,50	0,54	0,60	0,68	0,76	0,88
	B	0,16	0,18	0,20	0,22	0,26	0,30	0,34	0,40	0,48	0,56	0,68
140	A	0,40	0,42	0,44	0,48	0,54	0,60	0,68	0,76	0,86	1,00	1,20
	B	0,20	0,22	0,24	0,28	0,34	0,40	0,48	0,56	0,66	0,80	1,00
150	A	0,46	0,50	0,54	0,60	0,68	0,76	0,86	0,98	1,14	1,36	1,62
	B	0,26	0,30	0,34	0,40	0,48	0,56	0,66	0,78	0,94	1,16	1,42
160	A	0,56	0,60	0,66	0,74	0,84	0,98	1,14	1,32	1,56	1,88	2,30
	B	0,36	0,40	0,46	0,54	0,64	0,78	0,94	1,12	1,36	1,68	2,10

2.7.1.4 Konstrukce forem

Formy pro vstřikování plastů jsou jednou z nejdůležitějších součástí vstřikovacího stroje. Jedná se o nástroj, ve kterém dochází k odvodu tepla z taveniny a udává tak výsledný tvar součásti. Jako celek je tvořena z mnoha částí, mezi které patří tvářecí části, vtokový, chladicí a vyhadzovací systém nebo upínací a vodící prvky. Části, které se dotýkají roztaveného polymeru, nazýváme funkční, a ty, které zajišťují správnou funkci, nazýváme konstrukční. V současné době je mnoho dílů normalizováno, což urychluje návrh i samotnou výrobu formy.

Vstřikovací formy lze dělit dle několika hledisek:

- dle počtu dutin (jednonásobné, vícenásobné);
- podle typu vstřikovacího stroje (vstřikování do osy, vstřikování do dělicí roviny);
- podle uspořádání vtoku (dvoudeskové, třideskové, s horkým vtokem);
- podle konstrukce (jednoduché, čelistové, s výsuvnými jádry, vyšroubovací, etažové).

Násobnost forem ovlivňuje kvalitativní i kvantitativní stránku věci a počítá se z různých hledisek. Mezi základní omezení, která je třeba brát v úvahu, patří velikost vstřikovací dutiny a parametry vstřikovacího stroje. S ohledem na kvalitu vychází nejlépe jednonásobné formy. U forem s více dutinami je třeba vtokovou soustavu umístit tak, aby dráha toku taveniny byla co možná nejmenší a stejně velká. Tím se omezí nerovnoměrné chlazení a nežádoucí vznik vnitřního napětí.

Při výrobě forem se používá více technologií, které se kombinují nebo na sebe navazují. Jsou jimi hoblování, frézování, elektroerozivní obrábění, broušení a leštění. Forma udává tvar výslednému dílu, proto se přesnost formy odráží také v přesnosti výlisku. Při výrobě optických dílů se vyžaduje velice precizní povrch dutiny formy – zrcadlový lesk. Během výroby se všechny díly opotřebovávají, a tak kvalita postupně obecně klesá. Proto se po určitém počtu cyklů musí forma přeměřit, vyřadit, nebo opravit.

2.7.1.5 Temperační systém forem

Důležitým faktorem ovlivňujícím výsledný produkt při technologii vstřikování je teplota formy, resp. její temperování. Teplota a její průběh má přímý vliv na kvalitu dílu. V podstatě se jedná o systém kanálků uvnitř formy, ve kterých proudí chladící médium. Je tendence volit větší počet kanálků s menším průřezem. Vždy se však při návrhu přihlíží k celkové konstrukci a orientaci dominantních částí, jako je např. vtoková soustava. Proudící médium plyne z místa o větší teplotě do míst s nižší teplotou. Cílem je dosáhnout rovnoměrného ochlazení výstřiku za co nejkratší čas. Od toho se také odvíjí rentabilita procesu. O kolik dokážeme zkrátit dobu vstřikovacího cyklu, o to se navýší hodinová produkce stroje a forma se dříve splatí.

Přenos tepla mezi vstřikovaným materiálem, formou a chladícím médiem souvisí s tepelnou vodivostí použitých materiálů. Pro tyto potřeby se nabízí např. měď nebo její slitiny, které mají násobně vyšší tepelnou vodivost než oceli. Konstrukční řešení však bývá často natolik složité, že od její aplikace se z finančních důvodů upouští. Do celkové bilance totiž také vstupují parametry chladicí kapaliny.

Průměr kanálků je volen v rozmezí 6–20 mm, přičemž okruh by neměl obsahovat tzv. mrtvá místa. Pro zjednodušení frézování složitých tvarů se používá systém přepážek. Ty mohou nabývat nejrůznějších tvarů od plochých po spirálovité přepážky. Dalším principem odvodu tepla jsou tepelné trubice. Jedná se o hermeticky uzavřenou trubku, ze které je vyčerpán vzduch. Dovnitř je vpraveno přiměřené množství vhodného média (freon, čpavek, etanol, pro vyšší teploty sodík, toluen). Jeden konec trubky představuje

výparnou část a druhý konec část kondenzační. Cirkulací média dochází ke zvýšení součinitele přestupu tepla a tím k intenzivnímu tepelnému toku. [14] [15]

2.7.1.6 Odvzdušnění formy

Při vstřikování taveniny do dutiny formy se vzduch uvnitř formy musí nějakým způsobem dostat ven. Jinak hrozí vysoký nárůst tlaku, který by mohl vést k zažehnutí a degradaci výstřiku. Mimo to nemusí tavenina vyplnit celý objem formy (nedostříknutí) nebo vytvořit v materiálu nežádoucí bublinky. Odvod vzduchu se umísťuje do místa, kam tavenina doteče ideálně jako poslední. V těchto místech bývají otvory, trny nebo vložky. Velice často se k tomuto účelu využívají malé netěsnosti kolem vyhazovačů. Hodnota šířky odvzdušňovacího kanálu je závislá na druhu termoplastu a průměrně se pohybuje do maximální hodnoty 0,05 mm.

Při vstřikování reaktoplastů se často před úplným naplněním dutiny forma pootevře o 0,1–0,2 mm, dojde k odvzdušnění, a pak se forma opět zavře.

2.7.1.7 Základní pravidla pro konstrukci plastových dílů

Při návrhu plastových dílů je třeba jejich konstrukci zohlednit s ohledem na výrobní technologii. Pro vstřikování plastů jsou dány doporučené zásady a pravidla, které přímo ovlivňují kvalitu výstřiků. Předem je třeba ještě zdůraznit, že celý návrh je potřeba důkladně promýšlet, neboť dodatečná úprava forem je velice drahá operace. Zároveň i výroba forem podléhá technologickým omezením, které je nutno zohlednit. Základní principy jsou shrnuty v následujících bodech.

- **Tloušťka stěny**

Hodnota tloušťky stěny výrobku často vychází z požadavků na jeho pevnost a houževnatost, ale odráží se i v celkové hmotnosti a ekonomice dílu. Větší tloušťka znamená více materiálu, delší časový cyklus a vyšší náklady. Je třeba si uvědomit, že rozdílné tloušťky chladnou rozdílnou rychlostí. Prvním pravidlem tedy je sjednotit tloušťku stěn. To platí i pro stěny v rohu. Není-li toto možné, měl by přechod být co nejplynulejší.

Pro zajištění dostatečné pevnosti se velice často používají žebra.

U tenkostěnných výrobků roste požadavek na výkon vstřikovacího stroje. Rychlost taveniny musí být dostatečně velká, aby se zabránilo předčasnému ztuhnutí materiálu před vyplněním celém formy.

- **Žebrování**

Žebrování slouží nejen k dosažení požadovaných mechanických vlastností, ale i například pro pozicování dílů při montáži nebo jako dorazy a vedení pomocných mechanismů. Základní parametry jsou tloušťka, výška, počet, umístění. Obecně se na protilehlé straně vytvoří propadlina, která se odvíjí hlavně od tloušťky žebra a použitého materiálu. Proto se tloušťka žebra navrhuje menší proti vlastní stěně o 33–40 %. S klesající stěnovou tloušťkou roste procentuálně tloušťka žebra. U stěn pod 1 mm už žebra bývají stejně tlustá jako vlastní stěna výstřiku. Vzhledem k zajištění dobré odformovatelnosti se žebra opatřují úkosy ve směru vyjmutí výstřiku.

- **Komínky**

Komínky jsou většinou válcové části s vnitřním otvorem, které slouží pro připojení dalších součástí nebo montáž samotnou. Nejčastěji se do nich šroubuje přímo šroub nebo závitová vložka. Pro komínky platí stejné zásady jako pro žebra. Tedy snaha zachovat stejnou tloušťku stěny. Pro vnější průměr se volí $(2 \div 2,4) \cdot D$ šroubu. V tomto případě se ale ve větší míře projeví vliv zaoblení u napojení ke stěně. Proto se může přistoupit k odlehčení patřičnou drážkou. I když se neplánuje využít celá vnitřní díra komínku, obvykle se dělá až k vnitřní stěně dílu. S vyšším komínkem se použité jádro chladí hůře, proto se dělá např. ze dvou částí.

Při vyztužování je třeba geometrií výztuh přispět ke snadnému odvodu vzduchu, nejjednodušeji zkosením.

- **Ostré rohy**

Ostré rohy jsou obecně koncentrátory napětí. Velikost vlivu však lze modifikovat poměrem R/h , kde R představuje velikost rádia a h tloušťku stěny. Proto, a i vzhledem k technologii vstřikování, je dobré ostré rohy opatřit zaoblením. Není to však pravidlo. Musí se brát v úvahu proveditelnost rádia ve formě.

- **Úkosy**

Aby vstřikovací proces došel zdárně až k výsledku, musí se podařit výstřik bez porušení odformovat. K tomu se všechny povrchy rovnoběžné se směrem odformování opatřují úkosem. Standardně se používá 1° . Při použití menších úhlů se zvyšuje pravděpodobnost defektu a nároky na povrchovou úpravu dutiny. Různé materiály mají různé požadavky na velikost úkosu.

- **Otvory a jádra**

Jádra jsou části formy, kterými se vytváří dutiny a otvory. Mohou být pohyblivá nebo nepohyblivá. Ta se používají pro otvory, které nemají osu shodnou se směrem odformování. Pokud jsou uchycena pouze z jedné strany, vydrží menší zatížení. Za velikých vstřikovacích tlaků může dojít k vyosení ze správné polohy. Je stanoven poměr mezi průměrem a délkou, který jádro snese. U jader uchycených za jeden konec je to 1 : 3, u chycených z obou stran je poměr dvojnásobný, tedy 1 : 6. Lze jít technologicky do vyšších poměrů, je ale třeba zajistit rovnoměrný obtok jádra roztaveným plastem.[14]

2.7.1.8 Kvalita ploch v dělicí rovině

Pro dosažení správné funkce formy se musí patřičná pozornost soustředit na kvalitu povrchů v dělicí rovině. Tyto plochy na sebe musí velice přesně dosedat, aby nedocházelo k nechtěným únikům roztaveného plastu, kterým se dutina formy plní. Proces, jímž se tato kvalita ladí, se nazývá tušírování. Na referenční desku se nanese tenká vrstva tušírovací barvy. Na ploše se dle stavu povrchu otiskne barevná mapa. Zbarví se místa, která mírně vystupují, a ta se poté ručně opracují zaškrabáváním pomocí zaškrabávacích nožů. Celý postup se opakuje do té doby, než vznikne dostatečně rovná plocha. V praxi se tušírování u lisovacích forem provádí tak, že se nanese tušírovací barva na obě plochy dělicí roviny a následně se forma uzavře. Po oddělení formy se podle barevné mapy opět postupuje zaškrabáváním. Proces tušírování není vázán pouze na rovinné plochy, ale lze s ním také detekovat prohlubně či výstupky kluzných ložisek.

2.8 Shrnutí

Plasty jsou velice atraktivním materiálem, který má mnoho výhodných i nevýhodných vlastností. Na přesnost plastových výlisků má vliv mnoho faktorů a predikce některých z nich vyžaduje obtížné výpočty, předně simulace toku materiálu, teplotního pole a následných pnutí a deformací dílů.

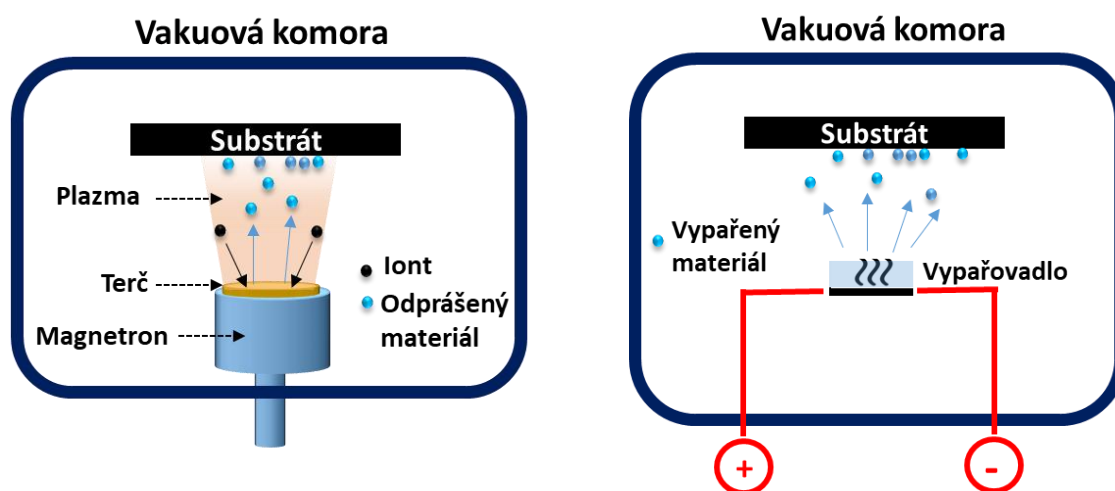
Je potřebné si uvědomit, že proces vstřikování probíhá za poměrně vysokých teplot, které způsobují změnu rozměrů vlivem teplotní dilatace materiálů – a to jak formy, tak i výstřiku. Díl pak na vzduchu po vyjmutí z formy chladne a absorbuje vlhkost, což vede ke změně rozměrů nazývané jako smrštění. Je to pozvolný proces, proto se díly nepřeměřují ihned po zchladnutí. Důležitým faktorem je samotná konstrukce formy, která vhodným návrhem může minimalizovat kroucení a deformaci dílů vlivem vnitřních pnutí.

2.9 Výroba tenkých vrstev

Důležitou součástí reflektorů je jejich vysoce odrazivý povrch. Ten je vytvořen nanesením tenké vrstvy kovového materiálu. Tenká vrstva označuje materiálovou strukturu, která má třetí rozměr (tloušťku) zanedbatelný vůči dvěma zbylým a jeho hodnota se pohybuje v řádu desítek nm až po jednotky μm . Mezi dvě nejpoužívanější metody nanášení tenké vrstvy patří napařování a napařování. Depozice probíhá u obou metod v uzavřené nádobě ve vakuu (Obrázek 4). Nízkým tlakem zvyšujeme střední volnou dráhu atomů a tím i pravděpodobnost, že atom nanášeného materiálu doputuje na substrát. Při napařování se materiál ohřívá a jeho páry posléze kondenzují na substrátu. Při napařování tvoří napařovaný materiál tzv. terč, ze kterého se vyrážejí atomy bombardováním částicemi vysoké energie.

Kvalita tenké vrstvy závisí na mnoha faktorech – na kvalitě povrchu, jeho čistotě, tvaru, adhezi nanášeného materiálu a substrátu, čistotě vakua, čistotě nanášeného materiálu atd.

Pro vytváření odrazných vrstev se používají převážně kovy – hliník, stříbro, zlato nebo platina, přičemž nejpoužívanější je hliník. Ten má snahu vytvářet na svém povrchu oxidy, které snižují odrazivost. Kvůli této skutečnosti se hliník ještě překrývá ochrannou vrstvou zamezující jeho kontakt se vzduchem.

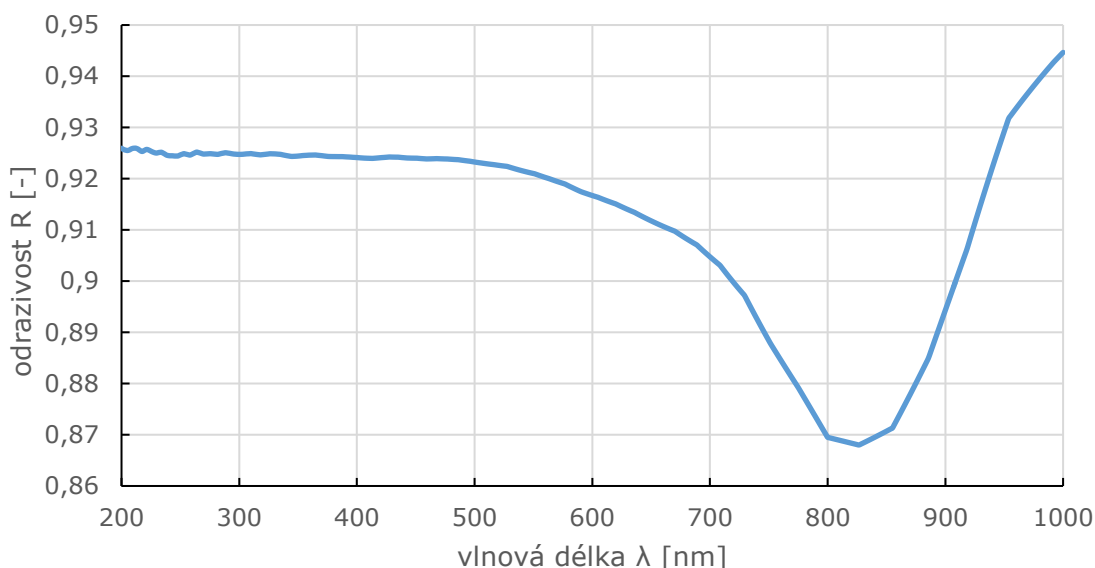


Obrázek 4 – Schéma vakuové depoziční aparatury pro napařování (vlevo) a napařování (vpravo) [18]

I přes vysokou hodnotu odrazivosti kovových povrchů se neodráží veškeré dopadající záření. Část energie se absorbuje a mění se v Joulovo teplo. To je způsobeno interakcí fotonů s volnými náboji atomů kovové vrstvy. Odrazivost je funkcí nejen vlnové délky záření, ale také funkcí úhlu, pod kterým záření dopadá, tloušťky vrstvy a indexu lomu

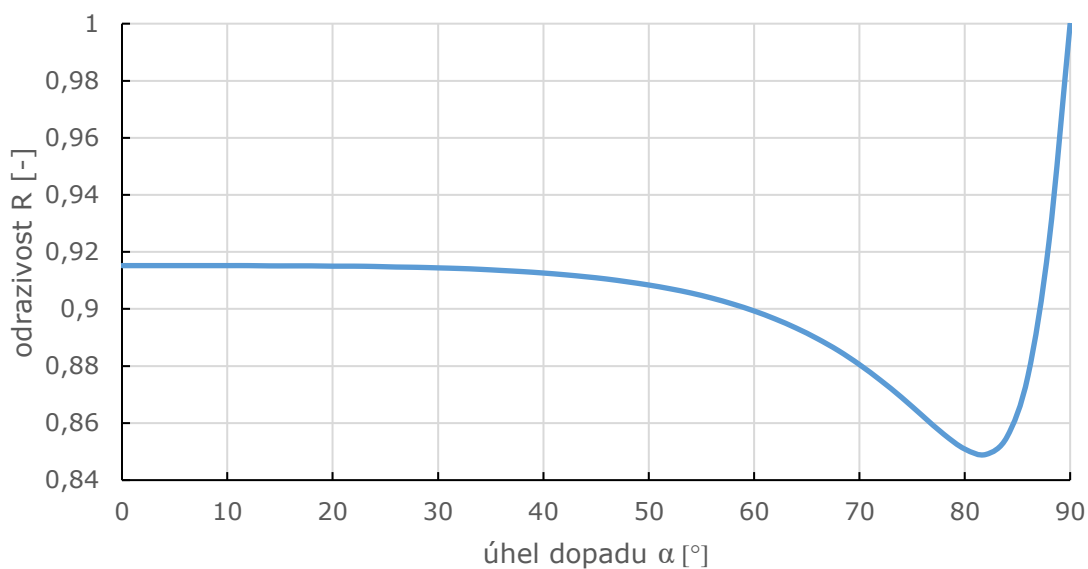
použitého materiálu. Na Obrázek 5 je znázorněn průběh kolmé odrazivosti hliníkové vrstvy na skleněném substrátu. Z jeho průběhu je patrné, že odrazivost kovové vrstvy je pro oblast viditelného spektra elektromagnetického záření přibližně 90 %. Pro zvětšující se dopadající úhel se odrazivost zmenšuje až do hodnoty úhlu $\alpha = 82^\circ$. Následně pak začíná opět růst (Obrázek 6).

Kolmá odrazivost hliníkové vrstvy



Obrázek 5 – Graf odrazivosti R kovové vrstvy na skleněném substrátu [20]

Závislost odrazivosti na úhlu dopadu



Obrázek 6 – Graf závislosti odrazivosti R hliníkové vrstvy na úhlu dopadu α

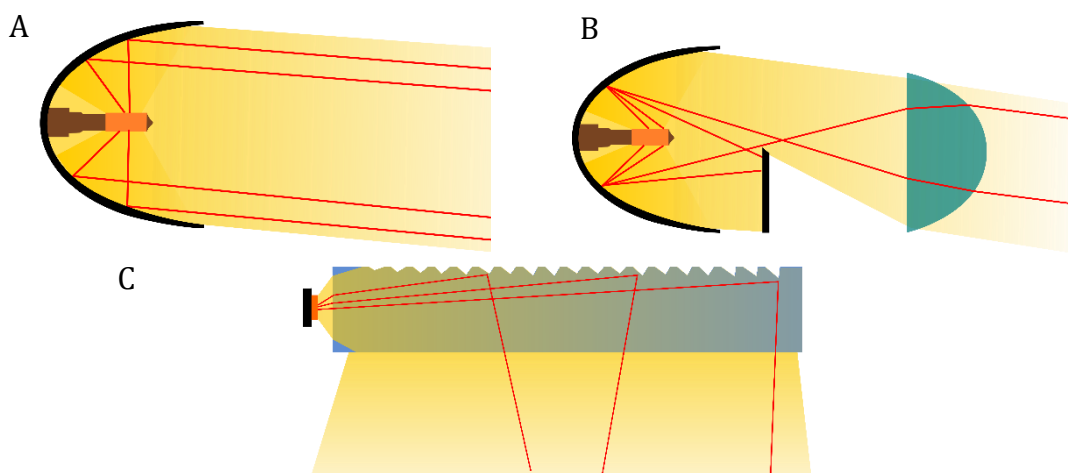
3 Konstrukce hlavního světlometu

Na začátku je třeba vymezit pojmy jako světlomet a svítilna. Zatímco světlomet je zařízení k osvětlování vozovky a jejího bezprostředního okolí, svítilna vymezuje vozidlo a signalizuje zamýšlené úkony řidiče. Přední světlo je tedy označováno jako hlavní světlomet a obsahuje jak světlometry (pro dálkovou a potkávací funkci), tak i svítilny (přední směrová a denní funkce).

Hlavní světlomet automobilu je separátní část vozu a podléhá celé řadě mezinárodních předpisů. Obsahuje několik mechanických, elektrických, chladících a optických systémů. Jednotlivé části můžeme rozdělit do tří skupin – funkční prvky, dekorační prvky a plášť.

3.1 Funkční prvky

Funkční prvky jsou zodpovědné za správnou funkci hlavního světlometu. Patří mezi ně zdroje světla, reflektory, čočky nebo různé moduly. V dnešní době se již upouští od optických prvků na krycím skle a můžeme tedy optické systémy rozdělit na tři základní – projekční, reflektorový, světlovodivý.



Obrázek 7 – Typy optických systémů (A – reflektorový, B – projekční, C – světlovodivý)

Projekční systém využívá různých čoček a stínítek. Jako zdroj světla se u tohoto typu používají xenonové výbojky a LEDky. Reflektorové systémy se skládají ze zdroje světla, kterým bývá buď žárovka, nebo LED, a reflektoru. Jeho povrch je pokoven a vykazuje velkou odraznost. Reflektory jsou jednoduché a levné. Posledním typem jsou světlovody. Ty se používají hlavně pro denní a směrové funkce. Jejich konstrukce je poměrně složitá a nebýt moderní výpočetní techniky, ladění správné funkčnosti by trvalo jistě násobně delší čas. Důležitým parametrem je homogenita vyzařovaného světla. Světlovody se

v automobilech začaly používat spolu s LED, které tento systém umožnily nasvítit, i když se účinnost světlovodů pohybuje zhruba kolem 10 %.

Důležitou součástí hlavně LED systémů je chlazení diod. Kromě emitujícího záření ve viditelné oblasti totiž také produkují velké množství tepla, které je potřeba ze soustavy odvádět, protože se zvyšující se teplotou čipu klesá jeho účinnost. Proto jsou PCB, na které jsou LED čipy napájeny, přilepeny speciálním teplovodivým lepidlem na chladič. Ten je z naprosté většiny případů vyroben z hliníku nebo jeho slitin. Někdy ale toto pasivní chlazení nestačí, a tak se přidává ventilátor, který vytvoří nucené proudění, zvýší koeficient přestupu tepla a snížeje teplotu chladiče, který tím pádem může být menší. Tomuto chlazení říkáme aktivní chlazení.

Důležitou součástí v této kategorii jsou také prvky pro seřizování světlometů. Jednotlivé optické systémy lze zvenku seřídít pomocí šroubů, které jsou vyvedeny skrz plášť. Většinou se jedná o seřízení směru v horizontálním a vertikálním. Modul je opatřen třemi klouby. První je pevný a spojuje modul s pláštěm hlavního světlometu. Další dva jsou vhodně pospojovány pomocí ramen tak, aby při otáčení venkovního šroubu docházelo k definovanému pohybu.

3.2 Dekorační prvky

Design je v automotive jeden z nejdůležitějších faktorů a i hlavní světlomet je mu podřízen. Ne úplně vždy jsou ale jeho požadavky realizovatelné. Při návrhu v podstatě probíhá ladění mezi třemi pohledy na věc. Design, který tlačí na minimální rozměry předního krycího skla, požadavky na technickou výbavu a ohled na výslednou cenu hlavního světlometu. Mezi dekorační prvky patří různé rámečky a lišty, které bývají buď nalisované, nebo našroubované.

3.3 Plášť

Plášť hlavního světlometu je tvořen pouzdem a krycím sklem. Pouzdro vymezuje zástavbový prostor, do kterého se musí umístit všechny výše uvedené komponenty. Zvenku jsou vystouplé tři šrouby, kterými je hlavní světlomet připevněn k základní konstrukci vozu. Krycí sklo a bývá přilepeno k pouzdru a prochází jím světelný kužel.

[16] [17]

4 Světelné zdroje

Nyní si představíme světelné zdroje používané v automotive a jejich vlastnosti.

4.1 Teplotní zdroje světla

Teplotní zdroje jsou nejstaršími zdroji, které lidstvo kdy používalo, a i do dnešního dne jsme jimi obklopeni. Historicky prvním zdrojem, které lidstvo vnímalo, byla nejbližší hvězda – Slunce. Na něm je závislá celá řada dějů na Zemi. Ve Slunci probíhá termonukleární reakce slučování atomů vodíku za vzniku helia a energie, která má podobu elektromagnetického vlnění. Dalšími zdroji byly také ostatní hvězdy, Měsíc a pak z pozemských zdrojů oheň. Princip teplotních zdrojů světla je popsán teorií záření černého tělesa, která je popsána Planckovým zákonem. Ten určuje spektrální rozložení intenzity vyzařování $H_{0e\lambda}$ [W/m^3].

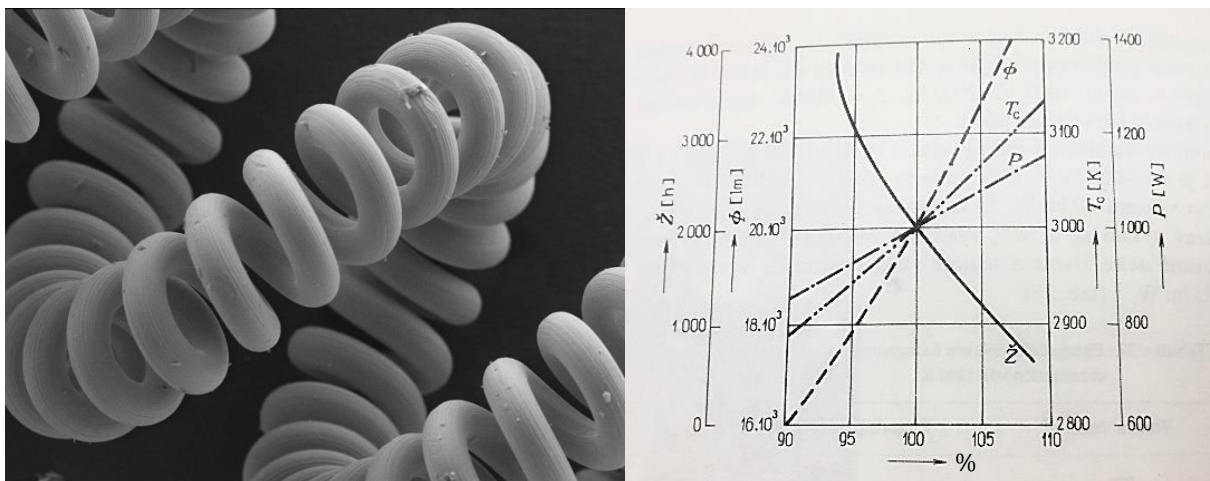
$$H_{0e\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} \quad (3)$$

Černé těleso je teoretický model tělesa, který veškeré dopadající záření absorbuje, a to vede ke zvýšení jeho teploty. Planckovým zákonem je tedy i definováno to, že teplotní zdroje mají spojité spektrum intenzity vyzařování.

V druhé polovině 19. století nastal prudký rozvoj dodnes používaného teplotního zdroje – žárovky. Postupně tak nahradil běžně užívané svíčky a petrolejové lampy. V žárovce se elektrická energie mění v teplo, které rozžhává tenký drátek z materiálu s vysokou teplotou tavení. Zároveň vyzařuje elektromagnetické vlnění i v pásmu viditelného spektra. To ale není dominantní, proto je její účinnost velice malá – kolem 2 %. Životnost a účinnost lze ale o trochu zvýšit například změnou média v baňce. Klasické žárovky jsou vakuované, můžeme ale vnitřní částí žárovky naplnit halogenovými plyny (jodem, bromem). Uvnitř probíhá tzv. halogenový cyklus, při kterém se vypařující se wolfram slučuje s plynem, následně se rozpadá a vrací se zpět do vlákna. Proto můžeme zvýšit teplotu žhavení wolframu, a tím zvýšit intenzitu vyzařování. [22]

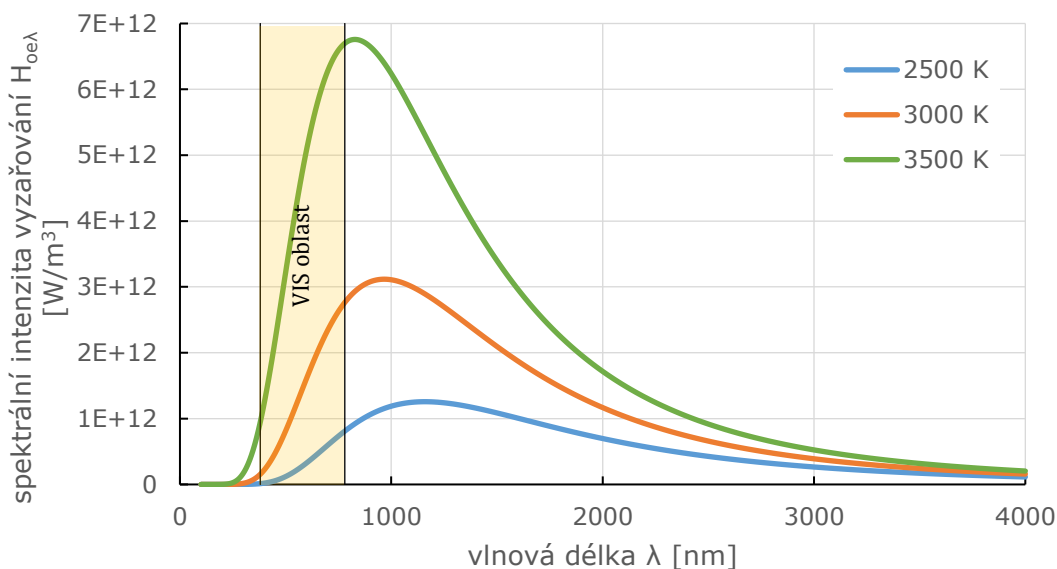
Žárovka se skládá z baňky, vlákna a patice.

I když současný trend osvětlování v automotive má směr nahrazování málo účinných žárovek za LED systémy, stále se reflektorové systémy s žárovkami používají.



Obrázek 8 – Wolframové vlákno žárovky [21], změny parametrů halogenové žárovky (ϕ – světelný tok, T_c – teplota chromatičnosti, P – příkon, \check{Z} – životnost) [20]

Planckův zákon



Obrázek 9 – Planckův zákon záření černého tělesa pro tři hodnoty teploty

4.2 Fotoluminiscenční zdroje světla

Hlavním zástupcem této skupiny jsou výbojky. To jsou uzavřené skleněné válce, které jsou naplněné různými párami plynů. Uvnitř se nacházejí dvě elektrody, na které je přivedeno vysoké napětí a mezi kterými probíhá doutnavý výboj. Atomy prvků uvnitř válce jsou excitovány do vyšších energetických hladin, které jsou ale nestabilní. V důsledku toho se vrací zpět do základního stavu a jejich přechod s sebou nese vyzařování energie ve formě fotonu. Protože jsou energetické hladiny přesně definovány – kvantovány, je také určen

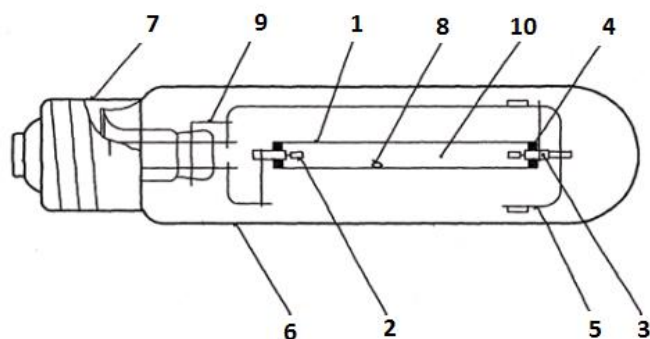
přechod zpět na základní hladinu. S tím je spojené i množství vyzářené energie, tedy vlnová délka fotonu.

Zásadní rozdíl proti teplotním zdrojům je ten, že nemají spojité spektrum intenzity vyzařování, nýbrž čárové. Některé přechody atomů vyzařují spíše v ultrafialové oblasti. Proto se na vnitřní povrch trubice nanáší vrstva luminoforu, který absorbuje fotony s vysokou energií a následně vyzáří foton s energií menší, který již je ve viditelné oblasti. Čárové spektrum je ovlivněno tlakem par. Pokud tlak zvyšujeme, čárová spektra se rozšiřují. Podle tlaku pak dělíme výbojky na nízkotlaké (do 100 kPa), středotlaké (do 10 MPa) a vysokotlaké (do 30 MPa). Nízkotlaké rtuťové výbojky jsou také známy jako zářivky.

Trubice se nejčastěji plní parami těchto prvků: Na, Hg, Cd, Xe, Ar, Ne, Kr, F, Cl, Br a I.

Výbojky mají pro své vlastnosti nezastupitelné místo v osvětlovací technice. Mají podstatně vyšší účinnost než žárovky a také lze jimi dosáhnout mnohonásobně vyšších světelných toků. Proto se s nimi můžeme setkat na místech, která vyžadují dobré osvětlení – stadiony, veřejná místa, nádraží, silnice, letiště.

V automotive se nejvíce ujaly xenonové výbojky jako zdroje s vysokou životností, teplotou chromatičnosti blízkou přirozenému dennímu světlu a vysokými světelnými toky.



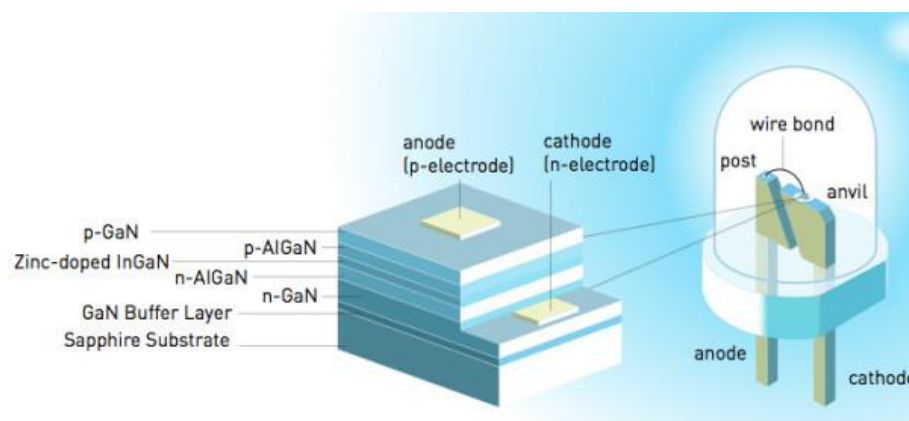
1. korundový hořák
2. elektroda
3. niobová průchodka
4. těsnící kroužek
5. nosný rámeček
6. vnější baňka
7. patice
8. amalgám sodíku
9. getr

Obrázek 10 – Konstrukce výbojky [24]

4.3 Elektroluminiscenční zdroje světla

Elektroluminiscenční zdroje světla převádějí elektrickou energii na světelnou. Jsou založeny na přechodu elektronu z místa s velkou energií do místa s energií nižší, během kterého vyzáří elektromagnetické záření. Tento jev byl objeven přibližně před 110 lety. Za tu dobu prošla technologie výroby masivním vývojem a v současné době je jeho aplikace do technické praxe zatím nenahraditelná. K jevu dochází na P-N přechodu polovodičových materiálů. Zapojením diody v propustném směru dochází k rekombinaci excitovaných volných elektronů s dírami a uvolňuje se energie ve formě záření. To je charakteristické úzkým spektrem vlnových délek, které záleží na daném materiálu čipu. Snadno se tedy vyrábějí jednobarevné LED diody, které by při použití pro osvětlování neuspěly. Vyrobit diodu vyzařující bílé světlo stálo nemalé úsilí, ale nakonec se to povedlo. Bílé LED jsou vyrobeny z diody vyzařující modré světlo a jsou pokryty luminoforem, který část tohoto spektra převede výše popsaným způsobem do oblasti zeleného a červeného světla.

LED mají mnoho výborných vlastností. Nabízejí vyšší účinnost, není potřeba tak vysokého napětí jako u výbojek, mají vysoké světelné toky, velice rychlou odezvu na sepnutí (řádově ns), mají rozsáhlou oblast lineární závislosti světelného toku na proudu, ladění teploty chromatičnosti, která se změnou intenzity nemění, malé rozměry (SMD aplikace). Limitujícím faktorem tohoto zdroje je odvod tepla. Teplo vzniká druhotně průchodem elektrického proudu polovodičem a jeho přítomnost má opačný účinek než u žárovek. Zatímco u žárovky žhavíme její vlákno na požadovanou teplotu, teplo vzniklé na LED diodě musíme odvádět, protože se zvyšující se teplotou klesá její účinnost. Proto se na zadní stranu čipu přidává chladič, který musí být u výkonnějších diod opatřen i aktivním systémem chlazení. Typická účinnost LED, tedy převod elektrické energie na světelný tok, se pohybuje v rozmezí 5–15 %. [25]



Obrázek 11 – Složení LED diod [26]

4.3.1 Výroba

Proces výroby LED čipu je složitý a při návrhu tohoto zdroje je třeba vycházet ze zadání, pro jakou aplikaci je určen. S vývojem nanotechnologií se postupně hledají cesty ke zdokonalování celého procesu.

Prvním krokem je výroba polovodičového krystalu. Ten se vyrábí vytahováním z taveniny např. Czochralskiho metodou. Materiál bývá nejčastěji GaAs, GaP nebo GaAsP. Následně je krystal nařezán na tenké plátky (cca 0,25 mm), které jsou čištěny, broušeny, leštěny. Následně jsou různými metodami nanášeny tenké vrstvy materiálu s požadovanými prvky, neboli dopanty. Tím vzniká sendvičová struktura představující hradlo diody. Poté se litografickou metodou za pomoci fotorezistu (materiálu citlivého na světlo) a masky připraví síť kontaktů. Vzniklá struktura se v napařovací komoře pokryje vrstvou kovu. Místa, kde se fotorezist vytvrdil, se odplaví a vzniknou kovové kontakty požadovaného tvaru. Abychom zajistili dobré spojení kovu s polovodičem, jsou jednotlivé plátky v komoře s inertní atmosférou ponechány při vysoké teplotě po dobu několika hodin. Takto připravený plátek se pak rozřeže na jednotlivé čipy. Ty jsou vloženy do plastového nebo kovového pouzdra a jeho kontakty propojeny jemným zlatým drátkem. Ten je z jedné strany připájen olovem a na povrch kovové vrstvičky matrice přilepen. Zlato se používá nejen kvůli své dobré vodivosti, ale také proto, že je měkké.

Takto připravený čip se v závěrečné fázi zapouzdří pryskyřicí, nebo směsí pryskyřice a luminoforu.

Výsledná kvalita čipu je závislá na čistotě vstupujících materiálů, krystalové struktuře a technologických podmínkách. Pro všechny procesy je vyžadována vysoká čistota a probíhají převážně ve vakuu. [27][28]

4.3.2 Binning

Jak již bylo nastíněno výše, výsledné vlastnosti LED diod závisí na mnoha parametrech ovlivnitelných během výroby. Udržitelnost těchto parametrů má svá omezení, a proto je svým způsobem každý čip originální a vykazuje jiné vlastnosti. Lidské oko je detektor, který velice dobře rozpozná i jemné rozdíly mezi dvěma zdroji. Zejména se jedná o změnu teploty chromatičnosti a vyzářený světelný tok při normalizované hodnotě proudu.

LED diody se v naprosté většině případů používají ve větším množství, a proto je snaha použít čipy s nerozeznatelnými rozdíly pro zajištění dobré homogenity. K tomu, aby výrobci LED diod mohli své produkty zařadit do podobných kategorií, vytvořili klasifikaci, které říkáme binning. Jedná se o rozřazení do různě označených skupin dle teploty

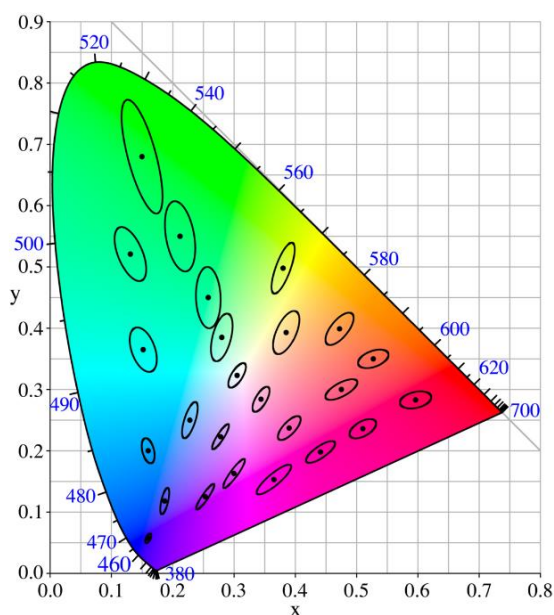
chromatičnosti, napájecího napětí a světelného toku. Tyto vlastnosti jsou pak uvedeny v datasheetu daného LED čipu.

4.3.3 Klasifikace dle teploty chromatičnosti

Rozdělení LED podle barvy je náročnější a je k tomu potřeba zavést chromatické diagramy, kterými můžeme barvy matematicky jednoznačně popsat. Jeden z prvních barevných prostorů je označován CIE XYZ a pochází z roku 1931. Proto je také známý pod označením CIE 1931. Diagram je znázorněn na Obrázek 12. Popisuje barvy za plného denního osvětlení pomocí dvou parametrů x a y . Rozložení barev je ale ve skutečnosti trojrozměrným jevem, přičemž třetí osou je jas.

V první polovině 20. století provedl fyzik MacAdam experimenty, které dokázaly, že v diagramu jsou oblasti, ve kterých lidské oko nerozezná barevnou odchylku vůči střednímu bodu. Tyto oblasti jsou nazývány jako MacAdamovy elipsy a jejich velikost a orientace nejsou konstantní. [29]

A právě z tohoto zjištění vychází i samotný binning. Diagram CIE 1931 je v oblasti bílého světla rozdělen na regiony, mezi kterými jsou rozdíly znatelné. Výrobci udávají souřadnice umístění svého zdroje světla v diagramu chromatičnosti.



Obrázek 12 – Diagram CIE 1931 s MacAdamovými elipsami [30]

4.3.4 Klasifikace dle napájecího napětí

Kromě barevné variace se také liší jednotlivé LED úbytkem napětí na čipu. Pokud by se jich sériově spojilo několik a procházel by jimi stejný proud, mělo by to za následek různý jas LED. A to je nežádoucí stav. Proto jsou diody rozděleny do skupiny podle úbytku napětí při definovaném proudu. Ukázka značení s parametry je v Tabulka 4.

Tabulka 4 – Rozdělení LED diod na základě různého úbytku U_f [31]

napětí U [V] při $I = 20 \text{ mA}$		
označení binu	min.	max.
D8	3,00	3,20
D9	3,20	3,40
D10	3,40	3,60
D11	3,60	3,80

4.3.5 Klasifikace dle světelného toku

Poslední parametr, který odlišuje stejné LED, je světelný tok při průchodu definovaného elektrického proudu. Ukázka rozdělení skupin je uvedena v Tabulka 5. Z těchto hodnot je patrné, že v rámci jednoho binu je možné, že se světelný tok dvou diod může lišit o více než 10 %.

Tabulka 5 – Rozdělení LED diod podle různého světelného toku [32]

Světelný tok Φ_V [lm] při $I_F = 1000 \text{ mA}$		
označení skupiny	min.	max.
6N	315	355
6NF	334	377
7N	355	400
7NF	377	424

V současné době se používání LED rozšiřuje do různých aplikací technických oborů. Pro současný trend v automotive osvětlování využívající např. chytré dálkové funkce (Matrix) je použití tohoto typu zdroje světla klíčové.

4.3.6 Osazování plošných spojů

S tím jak se automatizace a elektronizace rozšiřuje do dalších a dalších odvětví techniky, setkáváme se s ní dennodenně. Výroba chytrých obvodů, které plní požadované funkce, vede k jejich umístění na desky plošných spojů (PCB). Jejich tvar a rozměry nejsou téměř ničím omezené a vždy se volí s ohledem na konkrétní aplikaci a zástavbový prostor. Desky se osazují součástkami THT nebo SMD.

I v předních světloometech se nahrazením žárovkového zdroje světla za LED objevily PCB. Jejich umístění, uchycení a přesnost osazení hraje také určitou nezanedbatelnou roli na celkový světelný výstup a světelnou distribuci. S ohledem na odvod tepla z LED čipů bývají PCB světelné osazené z jedné strany výhradně SMD součástkami a druhá strana bývá pokovená pro zvýšení odvodu tepla. Touto stranou se pak lepší pomocí teplovodivé pasty na mohutný hliníkový chladič. Dle výpočtů proudění a šíření tepla se chladič opatřuje i aktivním chlazením.

Dnes se již PCB ručně neosazují. Současné technické možnosti nabízejí osazování na specializovaných osazovacích strojích s různou mírou automatizace. Na trhu jsou k dostání jedno nebo víceosé stroje s různým počtem podavačů pohybujících se v řádech stovek, s více tryskovými hlavicemi a kapacitou kolem 10 000 součástek/hodinu.

Zapájení osazených PCB probíhá několika možnostmi – pájení vlnou, laserem, selektivním pájením, nebo v pájecí peci. Každá z těchto metod má své přednosti a každá se hodí pro jinou aplikaci v praxi. [21]

Každý výrobce garantuje jinou přesnost osazení. Základní přehled intervalů je uveden v Tabulka 6.

Tabulka 6 – Přehled deklarovaných přesností usazování PCB

FIRMA	PŘESNOST	ODKAZ
Mesit	± 0,05 mm	https://www.mesitasd.cz/osazovani-desek-plosnych-spoju
Micro.cz	± 0,04 mm	https://www.micro.cz/technologie/
Orbit Merret	± 0,03 mm	http://www.merret.cz/produkty/osazovani-plosnych-spoju
TTC Telekomunikace	± 0,03 mm	https://www.youtube.com/watch?v=Z0BNE_n4cOA

4.4 Chemoluminiscence

Vznik světla jako produktu chemické reakce nazýváme chemoluminiscence. Protože se jedná o děj, během kterého nevzniká teplo, vyzařované světlo bývá označováno jako studené. S tímto jevem se jistě setkal každý z nás. Typickým příkladem z přírody je světélkování světlušek.

K excitaci molekul dochází při chemických reakcích v kontaktu s činidlem (luminol + peroxid vodíku) nebo enzymem (luciferin) pouze tehdy, jsou-li splněny tři podmínky. V první řadě se musí jednat o exotermní reakci, při které vzniká dostatečně velká energie schopná excitovat molekuly. Nejčastěji se jedná o oxidaci. Druhou podmínkou je existence způsobu excitace molekul vzniklou energií bez přeměny v teplo. Posledním krokem pro chemoluminiscenci je, že se nadbytečná energie vyzáří ve formě fotonu, nebo přeměnou ve fluoreskující sloučeninu, která prodlužuje dobu světélkování. [33]

Energie záření není pro hromadnou technickou praxi moc použitelná, ale v jiných oborech své uplatnění našla. Převážně se jedná o biologickou a klinickou praxi, analytickou chemii, monitoring čistoty vzduchu nebo detekování stop krve v kriminalistice. [34]

4.5 Kvantové zdroje

Základním představitelem této skupiny zdrojů elektromagnetického záření je laser. Toto označení je zkratka – akronym, tedy vzniklo spojením prvních písmen slovního spojení (z anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Tyto zdroje vykazují specifické vlastnosti, které jiné zdroje nemají. Především se jedná o velice dobrou koherenci záření, vysokou monochromaticnost a rovnoběžnost paprsků.

Laser se skládá z aktivního prostředí, rezonátoru, budícího systému, chlazení, řízení a přídatných komponent.

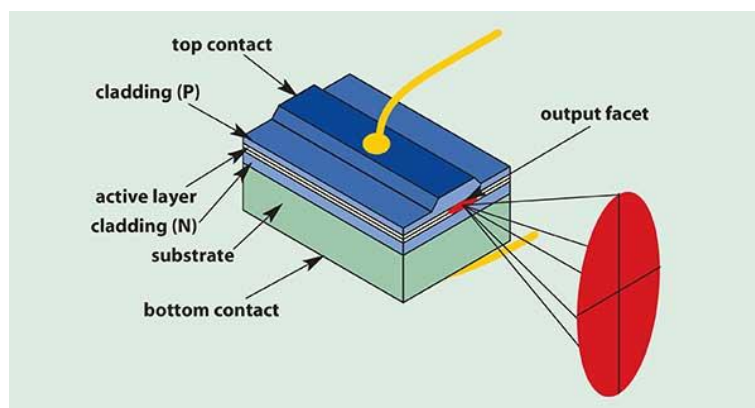
Princip laseru je založen na stimulované emisi. Každý excitovaný atom je nestabilní a snaží se zaujmout energeticky nejvýhodnější stav. Proto elektrony, které jsou vnějším zdrojem energie excitovány do vyšších energetických hladin, se za nějaký čas samovolně vrací zpět na svůj základní stav a vyzáří přitom foton charakteristické frekvence. Tomu se říká spontánní emise. Při stimulované emisi letící foton stimuluje excitovaný atom k přechodu na nižší energetickou hladinu, přičemž se vyzáří foton identický s původním. K tomu je potřeba dosáhnout v aktivním prostředí inverzi populace energetických hladin.

To znamená, že excitovaný stav bude zastoupen ve větší míře než atomy v základním energetickém stavu.

Aby se zvýšila pravděpodobnost setkání excitovaného atomu s letícím fotonem, je laser ohraničen rezonátorem. Ten je nejčastěji reprezentován dvojicí zrcadel, z nichž je jedno polopropustné. Lasery můžeme rozdělit například podle druhu aktivního prostředí na plynové, kapalinové, pevnolátkové a polovodičové. Každá kategorie se liší svou konstrukcí, využitím a vlastnostmi. V automotive se výlučně používají lasery polovodičové, kterým se budu věnovat detailněji.

Ve své podstatě se jedná o obdobný princip jako u LED diod. Rekombinací páru elektron-díra, které jsou bohatě obsaženy v polovodičích typu N (elektrony) a P (díry), dochází k vyzáření fotonu. Použitý materiál přímo souvisí s vlastností záření. Nejčastěji se používá forma slitiny hliníku s galium arsenidem. Při dostatečně vysoké plošné hustotě procházejícího proudu dochází k inverzi populace hladin. Díky vysokému zisku v aktivním prostředí nám stačí krátký rezonátor, který se u polovodičových laserů realizuje vyleštěním stran krystalu. Protože laserový svazek vychází z tenké vrstvy aktivního prostředí (řádově μm), je jeho směrová charakteristika ovlivněna jeho ohybem. Pro zvýšení výkonu laseru se jednotlivé aktivní vrstvy skládají na sebe s minimální změnou rozměrů. Proto jsou polovodičové lasery velice kompaktní a s vysokou účinností.

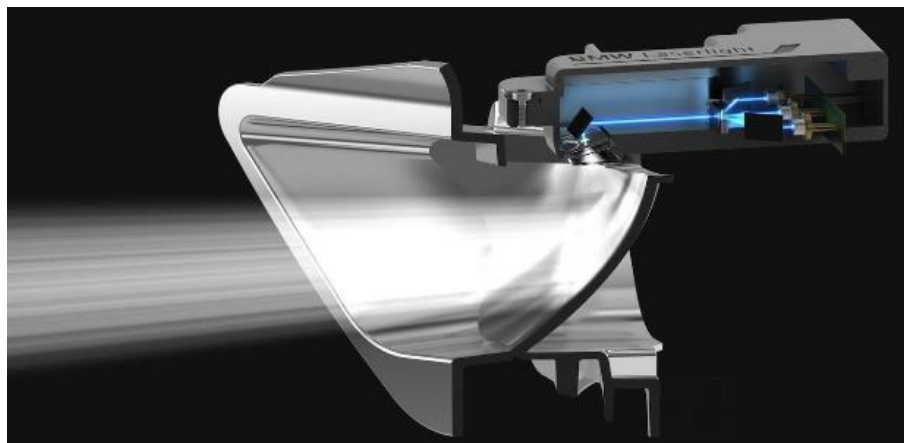
[33]



Obrázek 13 – Schéma polovodičového laseru [35]

V automotive se použití laseru objevuje spíše v prémiových řadách vlajkových lodí automobilek, a to zatím pouze u dálkových funkcí (BMW i8, Audi R8 LMX). Ty dokáží osvětit až 2x vzdálenější místa oproti LED (až 600 m). Stejně jako u technologie výroby LED nelze přímo produkovat diody emitující bílé světlo, tak i u laserů se bílá barva světla řeší luminoforem. Princip světlometu je znázorněn na Obrázek 14. Paprsky laseru o vlnové délce 450 nm jsou soustředěny pomocí zrcátek do jednoho bodu, prochází přes

luminofor, který část světla převede do oblasti s delší vlnovou délkou, čímž se dosáhne bílé barvy světla. Dále světlo dopadá na reflektor a je vyzářeno v žádaném směru. Díky menšímu zástavbovému prostoru lze vytvořit menší světla se stejnou funkcí. To může představovat určitý designový potenciál. [37]



Obrázek 14 – Princip laserového světlometu společnosti BMW [38]

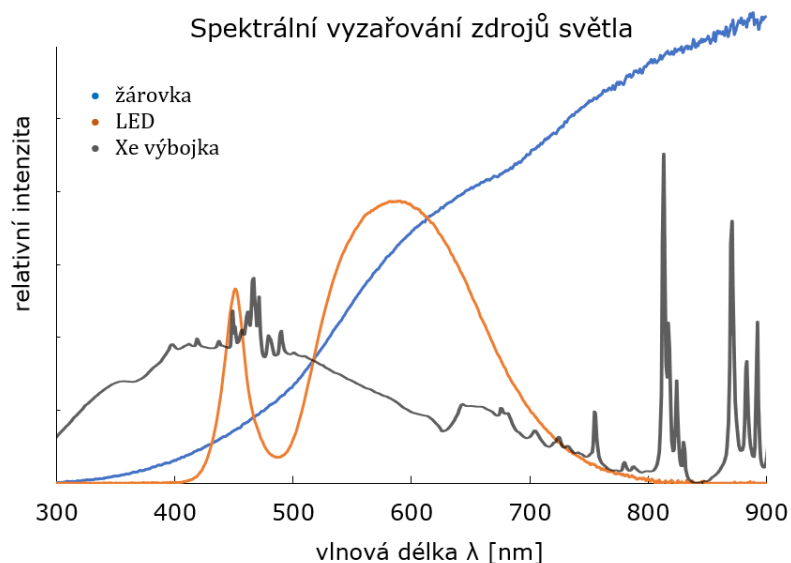
4.6 Spektrální a prostorové charakteristiky zdrojů světla

Mezi základní charakteristiky zdrojů světla patří spektrální a prostorové charakteristiky, podle kterých můžeme dané zdroje hodnotit.

Spektrální charakteristika udává, jaké vlnové délky a v jaké míře jsou ve světle zastoupeny. To nám napomáhá určit a porovnávat barevné podání světla. Většinou je znázorněna v grafu, který má na svislé ose intenzitu a na vodorovné vlnovou délku.

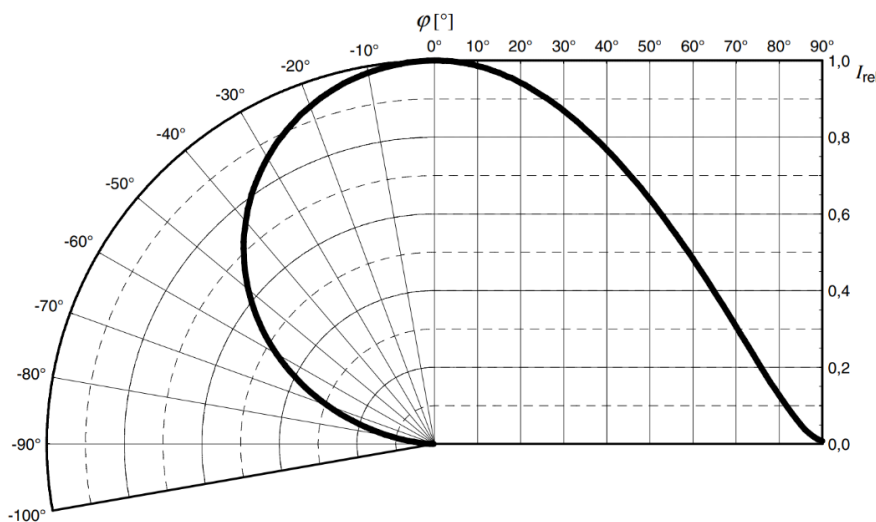
Tyto charakteristiky dělíme podle tvaru, který souvisí s principem vzniku záření, na čárové nebo spojité. Na Obrázek 15 jsou uvedeny spektrální charakteristiky tří zdrojů světla – žárovky, LED a Xe výbojky. Spojité spektrum žárovky má rostoucí intenzitu s rostoucí vlnovou délkou, což krásně ukazuje to, že žárovky více topí, než svítí. Oranžová křivka má typický tvar pro bílou LED. První výrazný vrchol je v oblasti modré barvy a odpovídá záření na P-N přechodu. Druhý vrchol, obsahující vlnové délky od zelené po červenou barvu, je způsoben přítomným luminoforem, který převádí část modré složky.

Spektrum Xe výbojky vykazuje výrazné vrcholy na jednotlivých vlnových délkách, a proto je označováno jako čárové. Poloha čar odpovídá složení plynu uvnitř trubice.



Obrázek 15 – Spektrální vyzařování tří typů zdrojů světla (uvedené intenzity nejsou proti sobě v měřítku) [39]

Směrová charakteristika popisuje závislost mezi intenzitou vyzařování a směrem šíření. Graficky se zaznamenává v polárních nebo kartézských souřadnicích. Na Obrázek 16 jsou kombinovány oba způsoby. Většinou se udává typický úhel vyzařování (např. 120 °). Tento vrcholový úhel vyjadřuje prostor, ve kterém daný zdroj září vyšší než 50% intenzitou v přímém směru. Tento údaj je důležitý pro znalost distribuce světelného toku a dobrý návrh dalších optických dílů, do nichž chceme daný světelný tok navázat.



Obrázek 16 – Směrová charakteristika vyzařování [32]

5 Fotometrie

Světlem nazýváme jen malou část elektromagnetického záření, které vnímáme zrakem. Jeho vlnové délky se pohybují v intervalu (380–780) nm. V osvětlovací technice nehodnotíme energii záření, ale více nás zajímá světelný účinek na zrakový orgán a celkový zrakový vjem. K tomuto posouzení slouží fotometrie a fotometrické veličiny, které respektují proměnlivou citlivost lidského oka.

Přehled fotometrických veličin je uveden v Tabulka 7. [40]

Tabulka 7 – Přehled fotometrických veličin

název	předpis	jednotka
Světelný tok	$\phi = K_m \int \phi_{e\lambda} V_\lambda d\lambda$	lumen [lm]
Svítivost	$I = \frac{d\phi}{d\Omega}$	candela [cd]
Jas	$L = \frac{dI}{dS'}$	nit [cd · m ⁻²]
Osvětlení	$E = \frac{d\phi}{dS}$	lux [lx]

Základní veličinou je světelný tok ϕ . Ten udává množství energie elektromagnetického záření, které jsme schopní lidským okem detekovat. Jednotkou světelného toku je lumen (lm). Světelný tok lze počítat jako součin maximální hodnoty světelné účinnosti monochromatického záření K_m [lm/W], která je dána vlastností detekujících buněk – čípků a tyčinek, a integrálu ze spektrální hustoty zářivého toku $\phi_{e\lambda}$ a relativní spektrální účinnosti monochromatického záření V_λ . Spektrální hustotu zářivého toku vyjadřuje Planckův zákon (2). Průběh spektrální citlivosti lidského oka je znázorněn na Obrázek 17 a má dva průběhy – pro skotopické vidění (za denního osvětlení) a fotopické vidění (za soumraku). Pro výpočty se používá průběh skotopického vidění s maximální hodnotou světelné účinnosti 680 lm/W.

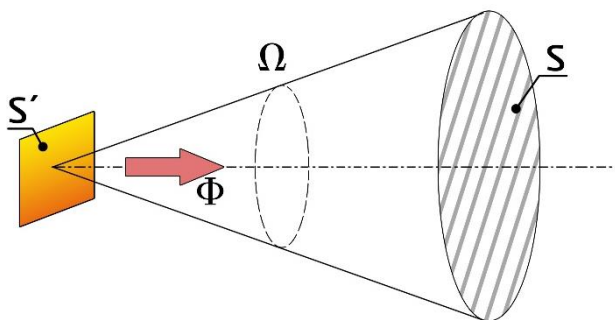


Obrázek 17 – Spektrální citlivost lidského oka [41]

Svítivost I vyjadřuje plošnou hustotu záření v daném směru. Jednotkou svítivosti je kandela a je součástí soustavy SI. Její název odpovídá faktu, že svítivost 1 cd odpovídá přibližně svítivosti jedné svíčky.

Veličina jas L je definovaná jako svítivost I zdroje vztažená na jeho plochu S' . Pokud zmenšíme plochu zdroje při zachování stejného světelného toku, jas se bude zvětšovat.

Poslední uváděnou veličinou je intenzita osvětlení. Její jednotkou jsou luxy a vyjadřuje světelný účinek záření dopadající na plochu S .



Obrázek 18 – Schéma označení veličin

Automobilový světlomet podléhá celé řadě přísných předpisů a norem, které musí být splněny. Jedná se nejen o vnitrostátní, ale i o mezinárodní předpisy, které zároveň předepisují i způsob měření. To probíhá ve speciálních laboratořích, které jsou vybaveny goniometrem, spektrometrem, měřícími fotočlánky, projekční stěnou a dalšími přístroji. Proces měření předních potkávacích světel je normován podle předpisu ECE 112. Podle tohoto předpisu se přední potkávací světlo měří ve vzdálenosti 25 m fotoelektrickým

článkem, který je přesně definován. Také jsou stanoveny hranice měřených hodnot, jako je například uvedeno v odstavci 5.3.2.3.:

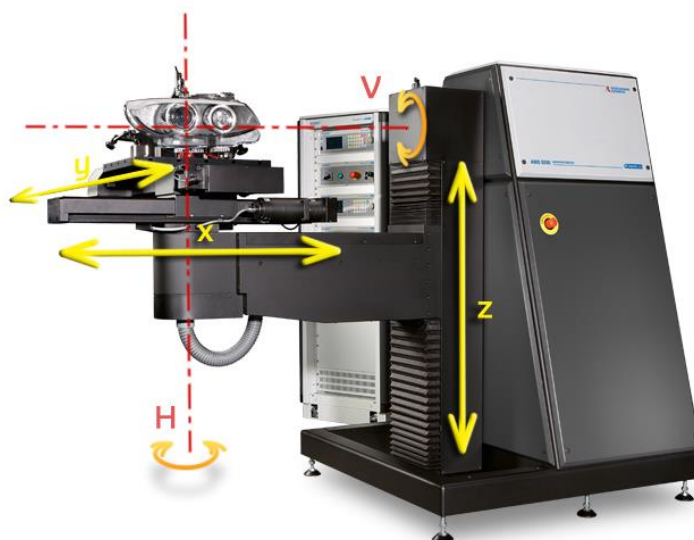
Celkový skutečný světelný tok všech LED modulů vytvářejících hlavní potkávací světlo a měřený podle odstavce 5 přílohy 10 musí se rovnat nebo být větší než 1000 lm.

Kromě svítivosti se také hodnotí osvětlení, homogenita, barevné spektrum či teplota chromatičnosti. Schéma laboratoře je znázorněno na Obrázek 20. Vzdálenosti jednotlivých členů jsou předepsány příslušnou normou.

Příklad komerčního goniometru pro automotive je znázorněn na Obrázek 19. Jedná se o přístroj s pohybem v pěti osách – posuvný pohyb podél osy X, Y a Z a rotační pohyb kolem osy V a H. Na jeho pracovní stolek se pomocí různých přípravků upevní proměřované světlo a propojí se dané konektory světelných funkcí s goniometrem.

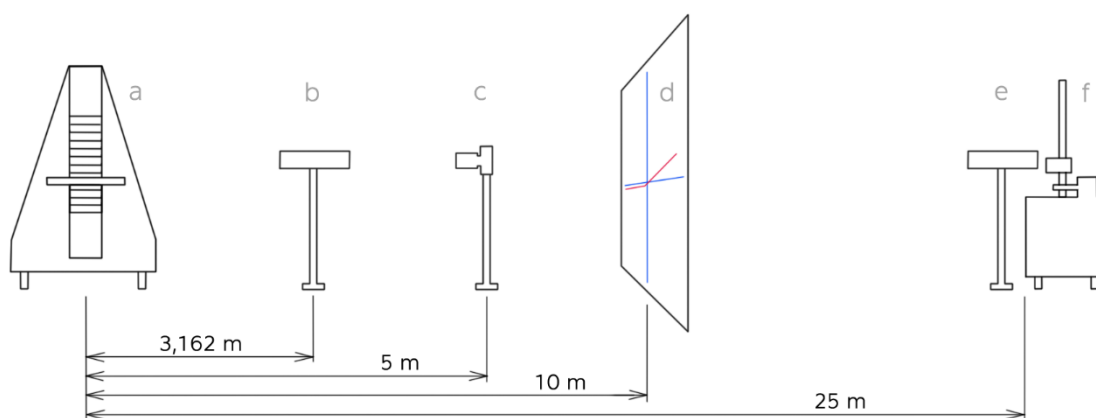
Ve vzdálenosti 3,162 m od vertikální osy jsou umístěny tubusy s fotočlánkem pro měření svítílen a se spektrometrem pro barevné hodnocení a ladění světél. Uvnitř tubusu jsou stínítka zabraňující odrazu světla od stěny. Na 5 metrech se nachází kamera. Ta se používá například pro vyhodnocování homogenity svítivosti zadních obrysových svítílen.

Laboratoř je také vybavena projekční stěnou. Jedná se o bílou část zdi, na které jsou načrtnuty významné oblasti, díky nimž se světlomet lépe pozicuje. Také slouží k prvnímu vizuálnímu zhodnocení světelné stopy, homogenity osvětlení. Ve vzdálenosti 25 m se nachází druhý fotočlánek pro měření světlometů potkávacích a dálkových funkcí. Na této vzdálenosti se nachází také retroreflektometr, který se používá pro měření odrazek. Retroreflektometr vysílá kolimovaný světelný svazek a měří, kolik světla se odrazí zpět.



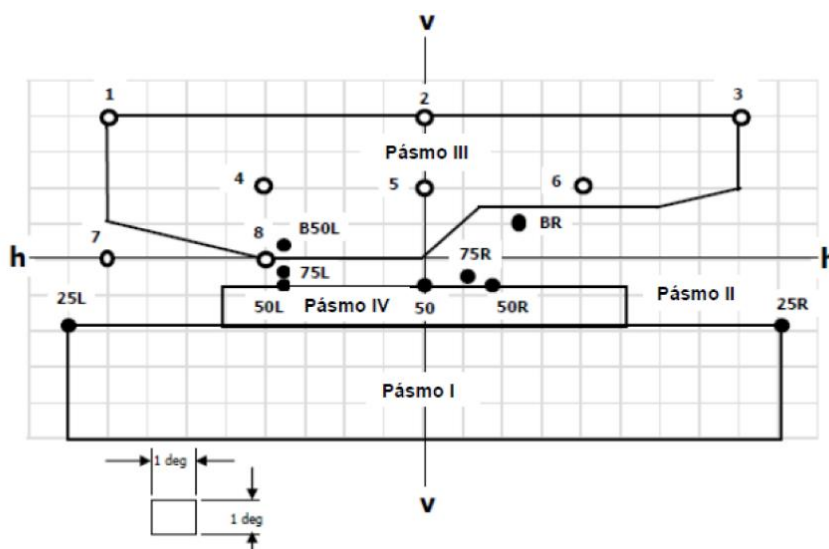
Obrázek 19 – Goniometr pro automotive [42]

Postup měření fotometrie potkávací funkce je následující. Nejprve se vhodně upne celý světlomet na stolek goniometru. K tomu se používají modulární, nebo pro dané světlo specifické stojany a příslušné konektory jsou zapojeny do zdířek. Dále je třeba zaměřit optický střed světla, tedy bod, kolem kterého se bude světlo při měření otáčet. Tento bod je důležitý pro zajištění opakovatelnosti měření. Měření probíhá v tmavé místnosti. Obsluha spustí odpovídající program, který pohybuje se stolkem goniometru v takovém úhlovém rozsahu, jak je požadováno. Úhlová vzorkovací frekvence bývá nejčastěji $0,1^\circ$. Proměření celé světelné mapy je velice časově náročné (cca 4 h).



Obrázek 20 – Uspořádání členů ve fotometrické laboratoři
(a – goniometr, b – fotočlánek, spektrometr, c – kamera, d – projekční stěna, e – fotočlánek, f – retroreflektometr)

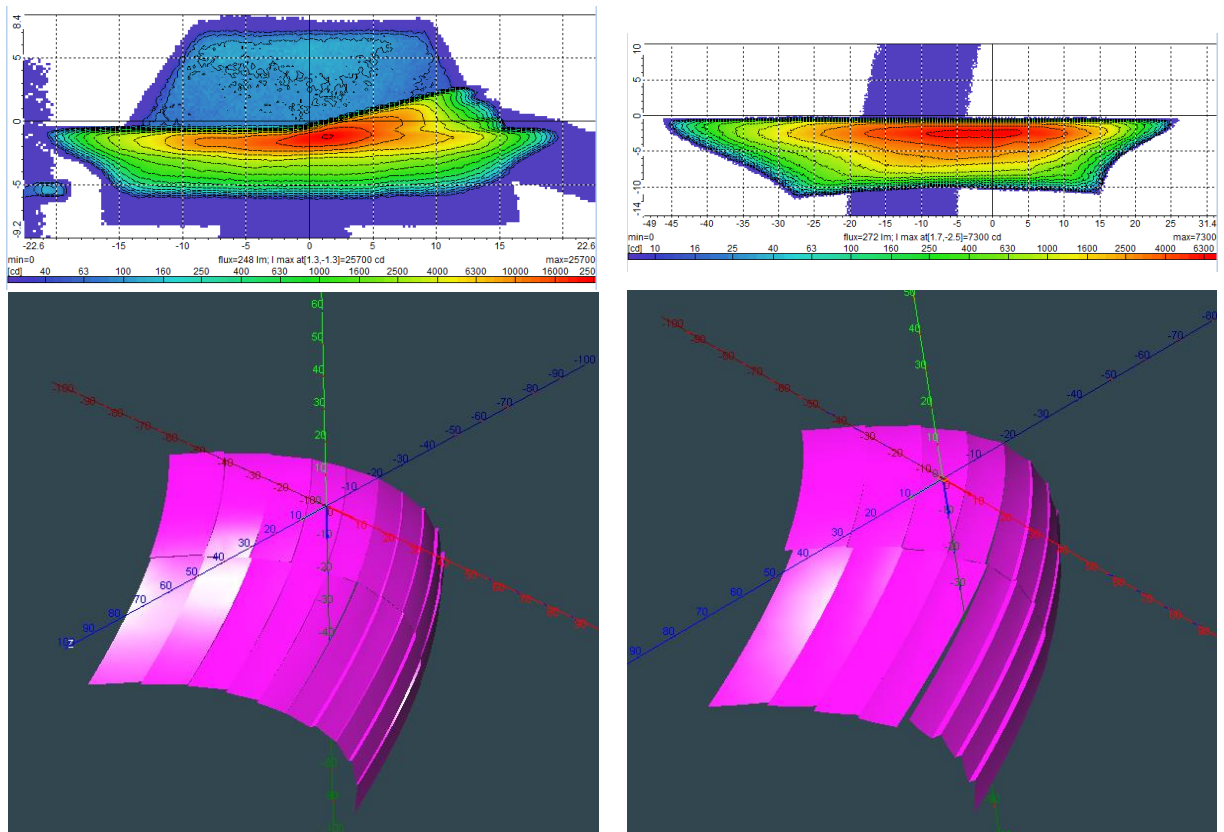
Změřená data se kontrolují s přepisem ECE112. Ten udává minimální a maximální hodnoty svítivosti v definovaných bodech. Na Obrázek 21 jsou znázorněny 3 pásma a hlavní vyšetřované body pro potkávací funkci pravostranného provozu. Nejvíce světla je vyžadováno pod h-h křivkou, aby nedocházelo k oslňování protijedoucích účastníků provozu. Této části světelné mapy se říká předpolí. Nad bodem 75R je oblast, na místě vykousnutí pásma II, kterému se říká kink. Světlo v této oblasti osvětluje vozovku před řidičem. Úhel kinku k horizontále se pohybuje v rozmezí $(30-45)^\circ$. Pásma III zajišťuje osvětlení návěstí.



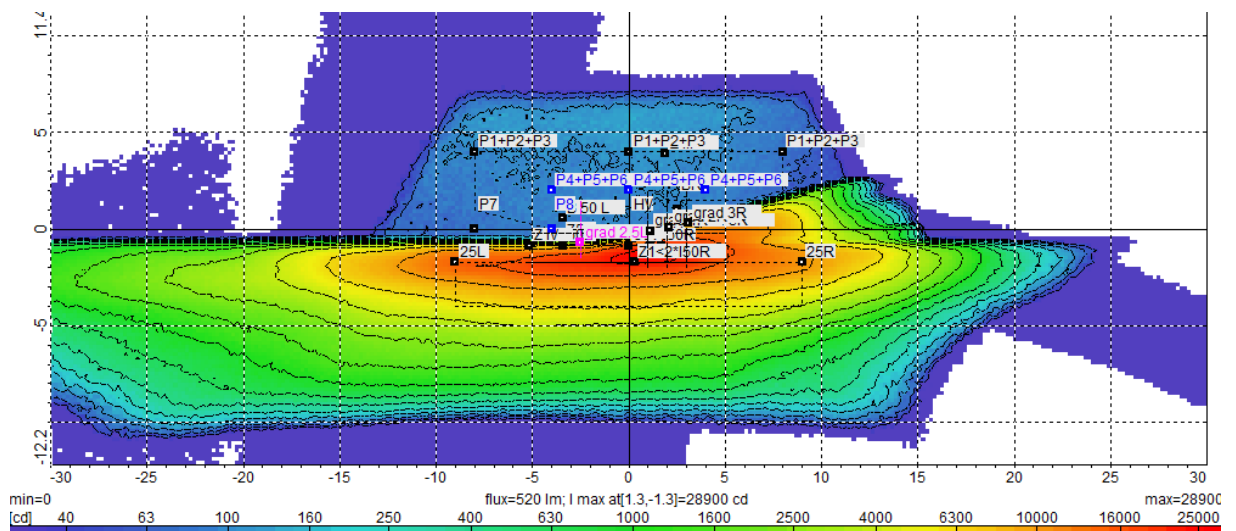
Obrázek 21 – Předpis pro potkávací funkci ECE112

Princip vytvoření tvaru potkávací funkce je u různých optických soustav rozdílný. Světlomety s xenonovými výbojkami obsahují clonky, které stíní nežádoucí místa. Projektorové systémy s řádkovým uspořádáním LED čipů zhasínají a upravují intenzitu jednotlivých čipů. Reflektorové systémy většinou obsahují dva reflektory, které si funkci rozdělují: první reflektor tvoří výraznou světelnou složku předpolí, tedy nezasahuje nad oblast ohraničenou h-h křivkou, a druhý osvětluje oblast kinku a také se podílí na osvětlení předpolí. Sloučená světelná mapa musí splňovat předpisy v předepsaných bodech.

Na Obrázek 22 jsou znázorněny jednotlivé světelné mapy reflektorů – vlevo je reflektor tvořící kink, vpravo je reflektor osvětlující předpolí. Sloučením obou map dostáváme světelné rozložení na Obrázek 23.



Obrázek 22 – Světelný příspěvek jednotlivých reflektorů



Obrázek 23 – Výsledná světelná mapa obou reflektorů

6 Optická analýza

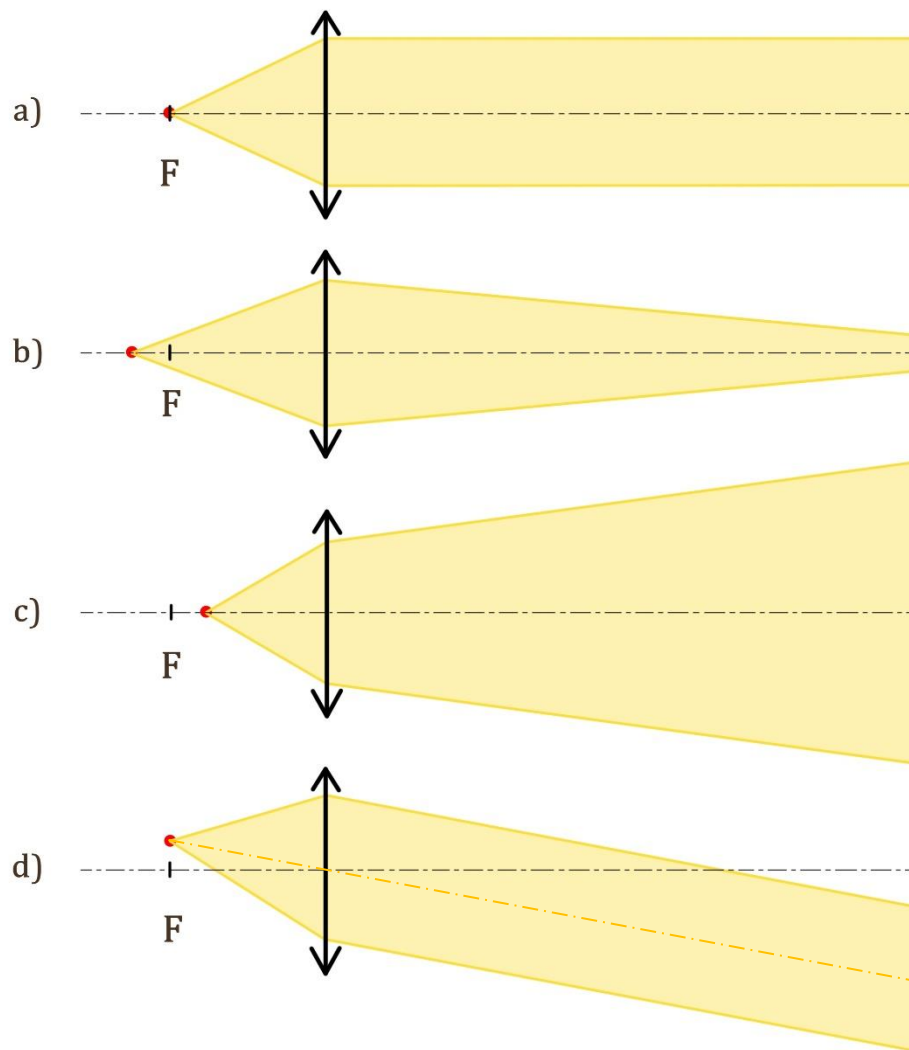
Nyní se zaměříme na samotnou optickou soustavu.

6.1 Deformace světelného svazku vlivem špatné pozice zdroje světla

Při návrhu osvětlení vycházíme z předpokladu, že jednotlivé díly jsou v ideální návrhové poloze. Při realizaci jakéhokoliv systému jsou jednotlivé díly nedokonalé ve smyslu toho, že se jejich tvar a vnitřní struktura liší od teoretického modelu. Při skládání těchto dílů se jednotlivé chyby sčítají a výsledná sestava je odlišná od zamýšlené. Samozřejmě je pro každý díl uvažováno určité toleranční pole, které bilancuje možnosti technologie výroby a ceny, za jakou se dané přesnosti dosáhne. Jistě je možné vyrábět velice přesné díly, ale jejich cena a časová náročnost neodpovídá požadavkům sériové výroby.

Jako příklad pro demonstraci vlivů na výsledný světelný kužel použijí projekční systém. V této části si dovolím zanedbat optické vady reálné optiky, pro jednoduchost nahradím skutečnou čočku čočkou tenkou a jako předmět použijí bodový zdroj světla. Chyby vzájemné pozice můžeme rozdělit do dvou skupin obecně nazvaných – defokus a decentr. Defokus je rozostření, tedy pohyb podél optické osy (Obrázek 24 b), c)). Decentr je pohyb kolmo na optickou osu (Obrázek 24 d)).

Jak je patrné, tak nepřesnosti pohybující se v optické ose zužují nebo rozšiřují světelný kužel a vlivem decentru se mění sklon celého kužele. Vždy se ale do jisté míry vyskytuje kombinace obojího, a tak může docházet jak ke zhoršení homogenity osvětlení, tak i k nedodržení fotometrických předpisů v určených bodech světelné mapy.

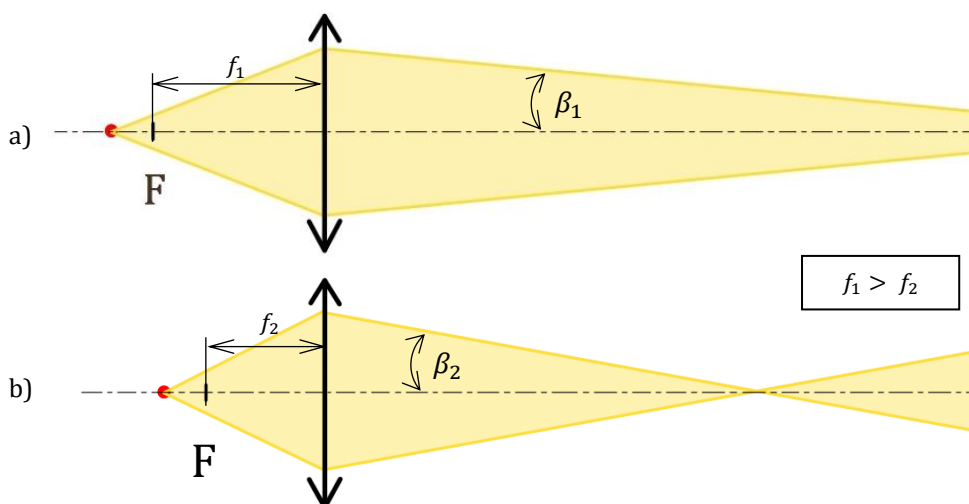


Obrázek 24 – Znázornění deformace světelného svazku vlivem nepřesností (a – ideální stav, b – defokus kladný, c – defokus záporný, d – decentr v ohniskové rovině)

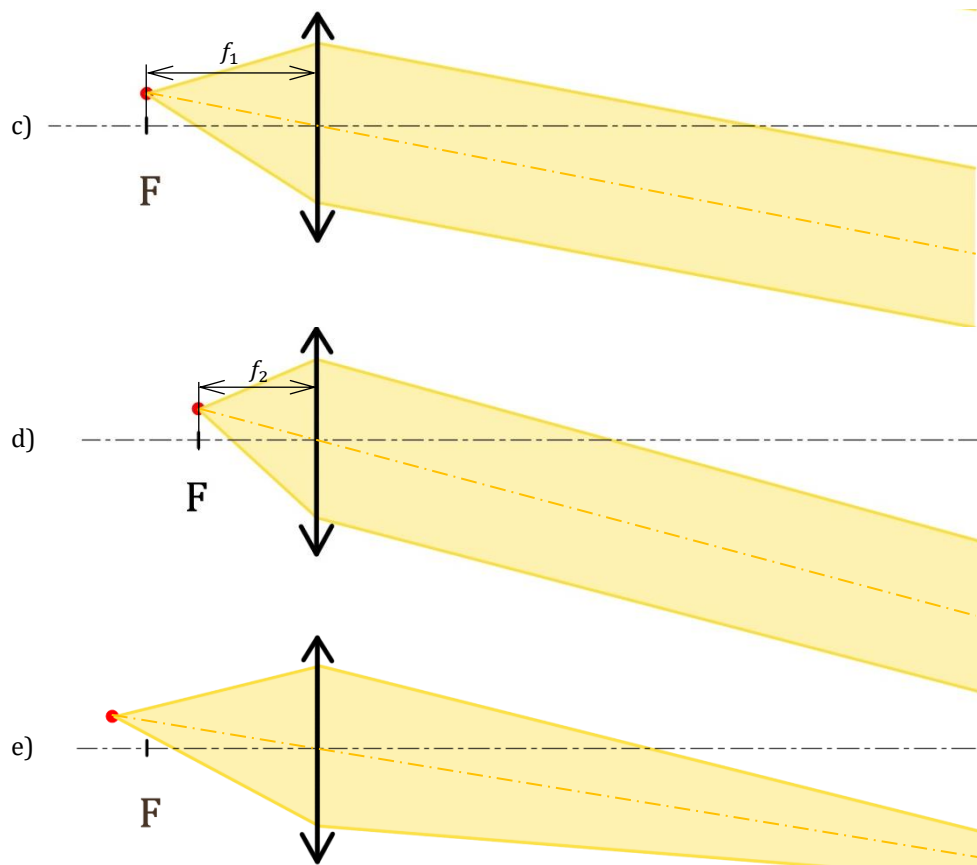
6.2 Citlivost optického systému na velikost ohniskové vzdálenosti

Jedním z trendů technického vývoje je zmenšování věcí při zachování, nebo možná i zlepšení původní funkčnosti. I v osvětlovací technice je snaha zvyšovat výkony a zmenšovat rozměry. Konkrétně se jedná o zkracování ohniskových vzdáleností optických soustav. Kromě lepší zástavbové situace nám jde i o další výhodu. LED čipy jsou zdroje s relativně velkým úhlem vyzařování (typicky 120°). To znamená, že jestli přiblížíme optický člen blíže čipu, při zachování původních rozměrů, budeme schopni usměrnit větší část světelného toku. Tento trend však má i druhou stranu mince.

Pokud zůstaneme u zjednodušení projekčního či reflektorového systému tenkou čočkou a LED čipu bodovým zdrojem, můžeme demonstrovat citlivost dvou soustav s rozdílnými ohniskovými vzdálenostmi na stejnou absolutní změnu polohy zdroje, jak je patrné na Obrázek 25. Bodový zdroj je zde opět znázorněn červenou tečkou a jeho posunutí po optické ose charakterizuje nepřesnosti vzniklé v tolerancích jednotlivých dílů. U horní soustavy (a) je světelný kužel fokusován daleko méně, než u soustavy (b). Z tohoto jednoduchého schématu vyplývá, že zmenšením ohniskové vzdálenosti soustavy, je tato soustava více citlivá na přítomné nepřesnosti. Tento závěr dokáží matematickým odvozením v následující kapitole. Snižování ohniskové vzdálenosti optických členů s sebou nese vyšší nároky na přesnost jednotlivých dílů, která se promítne do celkové výrobní ceny systému. Proto je třeba přechod k optice s nižší ohniskovou vzdáleností dobře uvážit.



Obrázek 25 – Schématické znázornění deformace světelného svazku pro výchylku podél optické osy (defokus) v závislosti na ohniskové vzdálenosti od požadované polohy



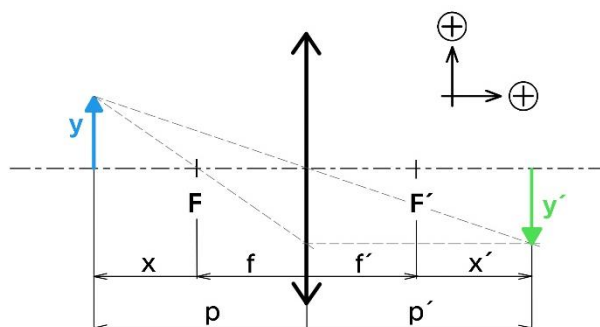
Obrázek 26 – Schématické znázornění deformace světelného svazku pro výchylku v ohniskové rovině (decentr) v závislosti na ohniskové vzdálenosti ($c + d$) a v obecné poloze (e)

6.3 Matematický popis

K tomu, abychom mohli daný problém lépe formulovat a porozumět mu, musíme ho převést do řeči matematiky. Vztahy mezi jednotlivými hodnotami ukáží vzájemné spojitosti a určit citlivost soustavy na jejich změny. Budu pokračovat ve zjednodušení, které spočívá v náhradě optického systému tenkou čočkou a ideálním bodovým zdrojem. Pro matematiku geometrické optiky je velice důležitá znaménková konvence. Je to obecně přijaté pravidlo, které umožňuje zahrnout do výpočtů kromě pouhých vzdáleností i další informace, které jednoznačně vypovídají např. o tom, zda se jedná o reálný či virtuální obraz, nebo o převrácení. Znaménkových konvencí existuje celá řada a každá používá odlišné vzorce. Během výpočtu se dodržuje jedna zvolená konvence.

Nejběžnější uspořádání je znázorněno na Obrázek 27 a vyjadřuje tato pravidla:

- 1) chod paprsku: jde zleva doprava;
- 2) velikost předmětu/obrazu: měří se od optické osy ke krajnímu mimoosovému bodu, směrem nahoru +, směrem dolů -;
- 3) vzdálenosti podél optické osy: měří se od čočky k danému bodu, doleva -, doprava +.



Obrázek 27 – Znázornění znaménkové konvence

Pro určení polohy obrazu využijeme Newtonovu zobrazovací rovnici, kterou lze použít při výpočtech jak na tlusté, tak i tenké čočce. Rovnice má tvar:

$$-f'^2 = x \cdot x' \quad (4)$$

kde x – vzdálenost předmětu od předmětového ohniska, x' – vzdálenost obrazu od obrazového ohniska, f' – obrazová ohnisková vzdálenost.

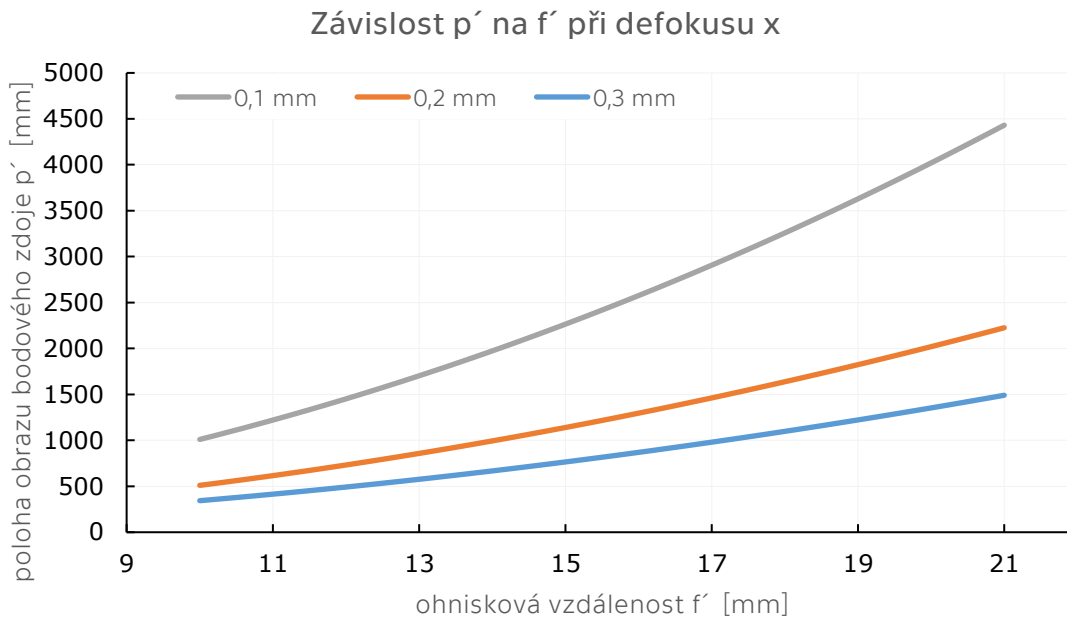
Z Obrázek 27 můžeme vyjádřit obrazovou vzdálenost p' jako součet:

$$p' = f' + x' \quad (5)$$

Dosazením vzdálenosti x' z Newtonovy zobrazovací rovnice do rovnice (4), získáme vyjádření obrazové vzdálenosti ve tvaru:

$$p' = -\frac{f'^2}{x} + f' \quad (6)$$

Pro grafické znázornění závislosti polohy obrazu na velikosti ohniskové vzdálenosti jsem zvolil tři hodnoty defokusu x – 0,1 mm, 0,2 mm 0,3 mm. Interval ohniskových vzdáleností zahrnutý do výpočtu vychází nejen z hodnot používaných ohniskových vzdáleností v osvětlování automobilů, ale také i ze současného trendu používat menší a menší ohniskové vzdálenosti.

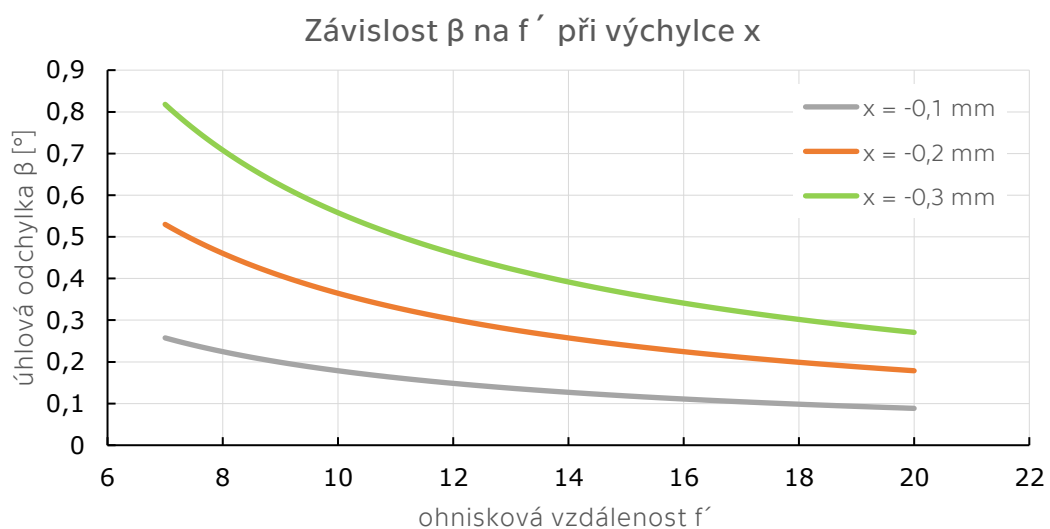


Obrázek 28 – Graf závislosti p' na f' pro tři hodnoty defokusu x

Protože se během návrhu světelných soustav používá výhradně úhlový popis, uvádím zde i odvozený vzorec pro úhel mezi paprskem v obrazové polorovině a optickou osou (Obrázek 25):

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{x^2 - f'x}{-f'^2 + f'x} \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (7)$$

kde x – vzdálenost předmětu od předmětového ohniska, f' – obrazová ohnisková vzdálenost, α – úhel mezi optickou osou a krajním paprskem vycházejícím z bodového zdroje světla. Úhel α jsem zvolil na základě parametrů modelového reflektoru.



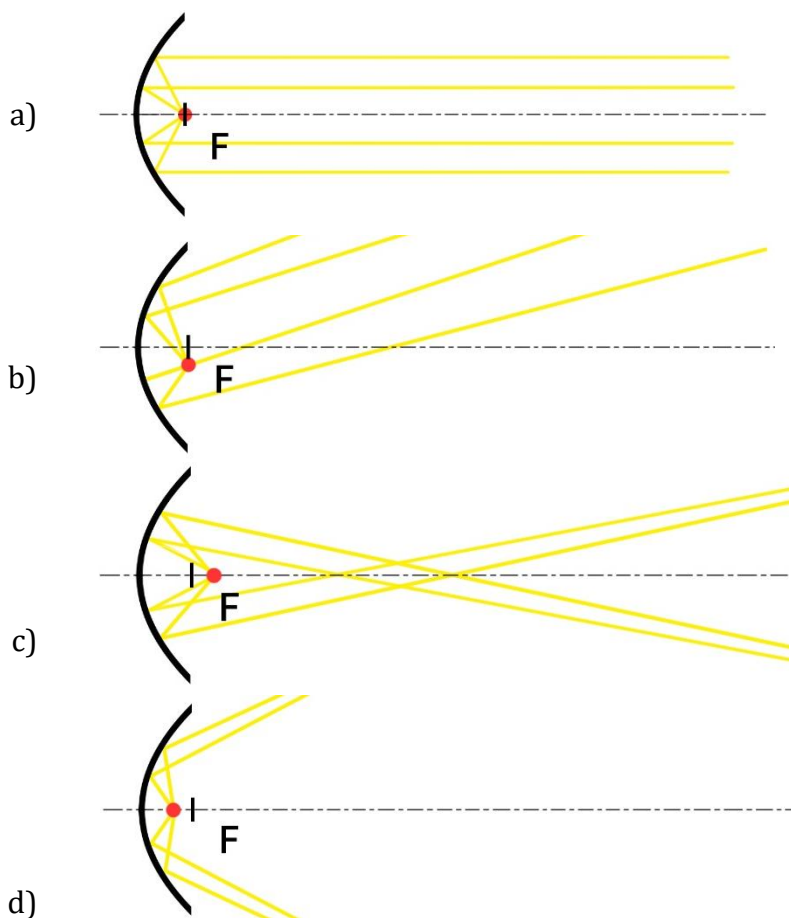
Obrázek 29 – Graf závislosti úhlu β na f' pro tři výchylky x

6.4 Parabolický reflektor

Do této chvíle jsme počítali se zjednodušením optických systémů na tenkou čočkou. Tato aproximace předpokládá paraxiální prostor, ve kterém platí kolineární zobrazení – tedy že se bod zobrazí na bod a úsečka na úsečku, nikoliv třeba na oblouk. Platí pro paprsky poblíž optické osy, kdy můžeme tangens úhlu svírající světelný paprsek s optickou osou nahradit samotným úhlem $\text{tg } \alpha \approx \alpha$. Pro vzdálenější paprsky pak pro tohoto zjednodušení dostáváme velké odchylky od skutečného chodu paprsků. Paraxiální prostor tedy nezná optické vady.

V osvětlovací technice se používají reflektorové systémy využívající parabolické zakřivení. Ale i ty můžeme v paraxiálním prostoru libovolně zaměnit za schéma tenké čočky. Na Obrázek 30 jsou znázorněny obdobně jako u tenké čočky deformace světelného kužele v závislosti na vychýlení bodového zdroje světla od ideální polohy v ohnisku. Bodový zdroj je zde symbolizován červeným bodem.

U reálných čočkových a parabolických systémů je ale využíváno jiného principu, a proto se liší i v přítomných vadách. Zatímco u čoček nastává lom světla, který popisujeme



Obrázek 30 – Chod paprsků u reflektoru v závislosti na pozici zdroje světla

Snellovým zákonem lomu $n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2$, kde figuruje index lomu, u parabolických reflektorů se uplatňuje zákon odrazu $\alpha_1 = \alpha_2$. Z toho je patrné, že se principiálně bude u čoček vyskytovat pro osové body otvorová a barevná vada. U parabolických reflektorů bude vždy paprsek vedoucí z ohniska zobrazovat ideálně do nekonečna. Pro ostatní paprsky nebude platit rovnoběžnost po odrazu, ale jejich směr bude určen dopadajícím úhlem a místem paraboly, od které se odrazí.

6.4.1 Úhlová citlivost paraboly

To, co ale můžeme u reflektorových systémů jednoduše matematicky popsat, je úhlová citlivost pro defokus i decentr. Parabola patří mezi kuželosečky, tedy křivky, které vzniknou řezem kuželové plochy. Obecně jsou její body definovány jako místa stejně vzdálená od přímky a bodu, který leží mimo tuto přímku. Matematický popis paraboly s osou rovnoběžnou s osou x je:

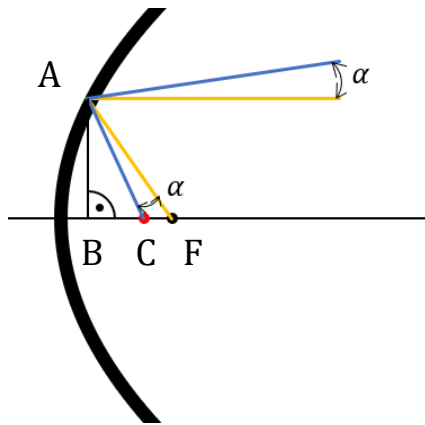
$$(y - n)^2 = 2p(z - m) \quad (8)$$

kde $[m, n]$ jsou souřadnice vrcholu paraboly a p – je vzdálenost ohniska od řídící přímky. Protože se využívá zákon lomu, je dobré urči normálu v daném bodě paraboly. Derivací rovnice získáme tečnu, která je k normále kolmá. Pro případ, že je parabola symetrická podél osy z , se souřadnice n rovná 0.

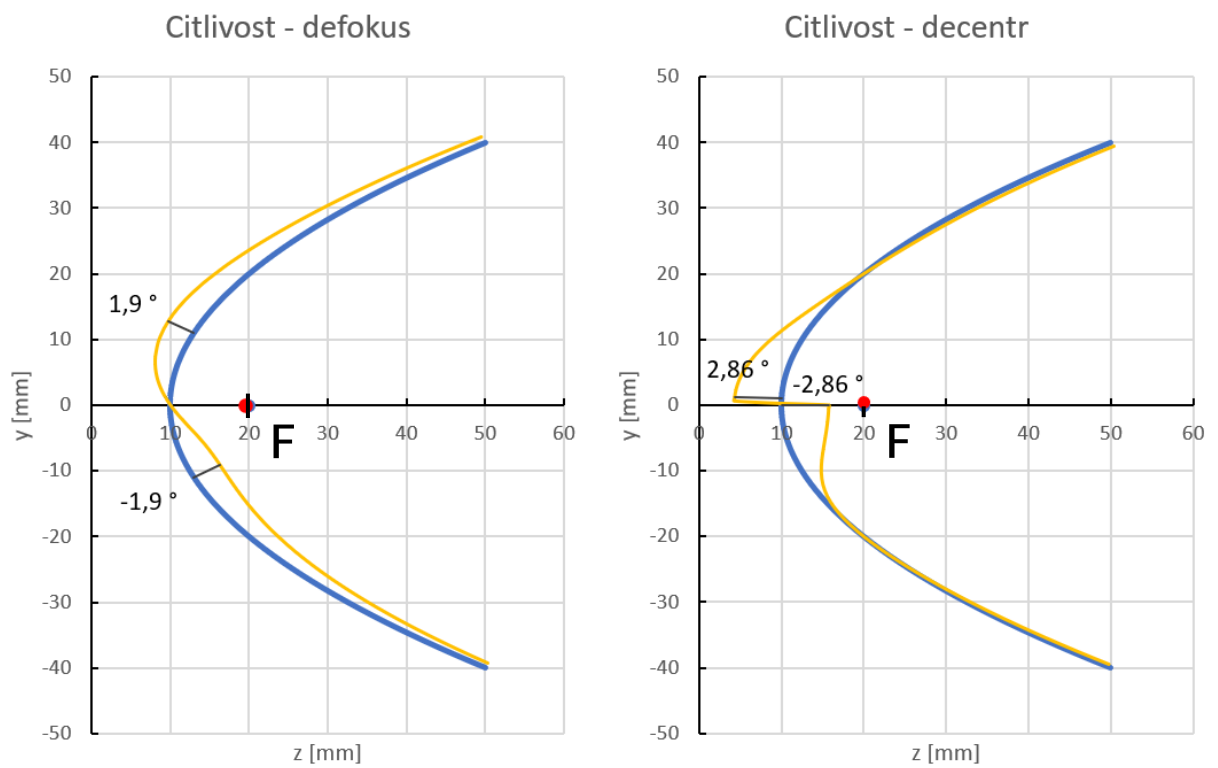
$$\frac{dy}{dz} = \frac{p}{y} \quad (9)$$

Ve vyšetřovaném bodě paraboly (A) jsme spustili svislici na osu z a spojil tento bod s ohniskem a bodovým zdrojem světla. Tím vznikly dva pravoúhlé trojúhelníky ($\triangle ABF$, $\triangle ABC$). Úhel mezi jejich přeponami je hledaná úhlová diference od vodorovného chodu odraženého paprsku jdoucího z ohniska (Obrázek 32).

Obrázek 31 graficky vyjadřuje velikost tohoto úhlu podél křivky paraboly, která je vyznačena modrou barvou. Kolmá vzdálenost žluté křivky od paraboly vyjadřuje právě tuto velikost. Červený bod zde značí bodový zdroj světla.



Obrázek 32 - Výpočet úhlové odchylky od ideálního paprsku



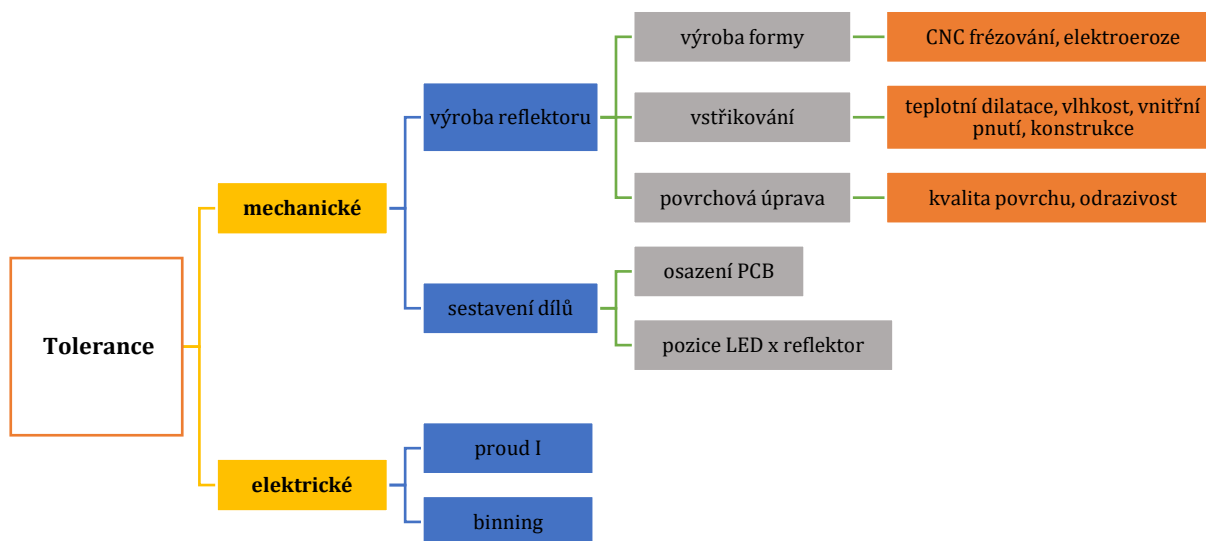
Obrázek 31 - Úhlová citlivost paraboly s ohniskovou vzdáleností 10 mm na defokus a decentr o velikosti 0,5 mm

7 Toleranční řetězec reflektorového světloometu

Toleranční analýza má za úkol stanovit zdroje chyb jednotlivých dílů až po celou sestavu zkoumaného objektu. V rámci stanovení tolerančního řetězce jsme rozdělili zdroje chyb do dvou oblastí – mechanické a elektrické. Do elektrických jsme zahrnuli vlivy svázané se zdrojem světla, tedy s LED technologií. Jako první jsou zde uvedeny odchylky zdroje proudu, kterým jsou LED napájeny. Velikost světelného toku LED totiž přímo závisí na velikosti proudu. Do této kategorie jsme ještě zařadili vliv binningu, tedy rozdílných vlastností dané skupiny LED. Touto kategorií se již dále zabývat nebudeme, svou pozornost věnujeme druhé oblasti – mechanické.

Mechanické zdroje chyb dělíme na odvozené z výrobních technologií a na vymezení vzájemnou polohu jednotlivých dílů. Výrobních technologií se používá velké množství a závisí od vyráběného dílu. Protože se jako konstrukční materiál používá plast, základní výrobní technologií je vstřikování do formy. Na samotném plastu také záleží, jakého je druhu, čistoty nebo vlhkosti. Během tohoto procesu dochází k vysokým teplotním rozdílům, se kterými souvisí teplotní rozpínatelnost materiálů. To zahrnuje velikost technologických parametrů během vstřikování jako například teplota taveniny, velikost tlaku, teplota a chlazení formy. Po vstřiku na produkt působí děje, nazývané obecně smrštění, které mění jeho rozměry.

Přesnost výroby formy pro vstřikování se odráží do výsledného dílu. Jak již bylo naznačeno v předchozích kapitolách, velký vliv má také samotná konstrukce dílů. Správným návrhem lze zdroje chyb minimalizovat.



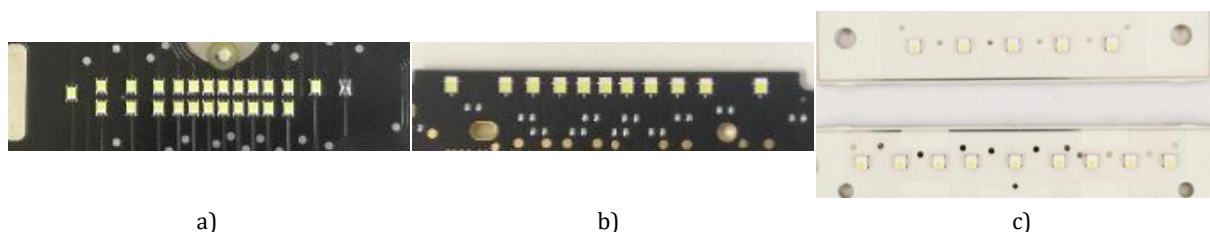
Obrázek 33 – Schéma tolerančního řetězce

Odrazné části reflektoru se opatřují tenkou hliníkovou vrstvou, která se ještě překrývá ochranným průhledným lakem. Pórovitost a tloušťka tenkých vrstev ovlivňují odražené paprsky.

Druhým druhem mechanických vlastností jsme zvolili sestavení dílů do jejich vzájemné pozice, vymezení vůlí. To zahrnuje jednak přesnost umístění LED na PCB osazovacími stroji a samotné ustavení PCB vůči reflektoru. Oba aspekty vstupují do optických zákonů reflektoru a určují výsledné světelné rozložení potkávací funkce.

7.1 Měření pozice LED čipů

Zkoumání nepřesností dílů je problematické a různě obtížné. Běžně se porovnává proměřený zrealizovaný díl vůči ideálnímu modelu. Ostrá data si ale každý výrobce bedlivě chrání, neboť v nich je ukryto část „know-how“ dané firmy. Protože nebylo možné navázat spolupráci s těmito výrobci, byli jsme odkázáni na zhodnocení pouze vyrobených dílů, a to ještě v omezeném množství. Na analýzu jsme měli k dispozici světlometry tří modelů vozů Škoda. Vzhledem k interní povaze dat jsou tyto modely označeny – model A, model B, model C. V každém tomto modelu je využito jiného optického systému, proto detailní společné vyhodnocení není možné. Jednou z možností bylo vyjmutí desky



Obrázek 34 – PCB čipy (a – model A, b – model B, c – model C)

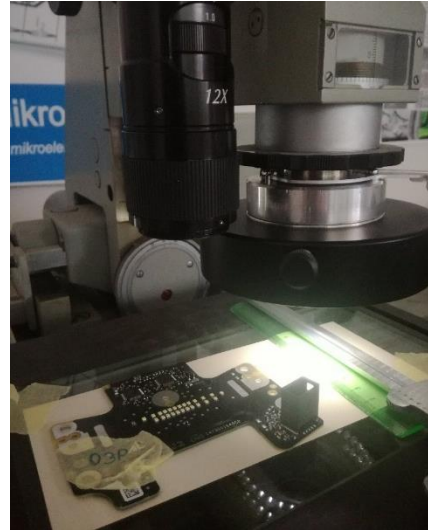
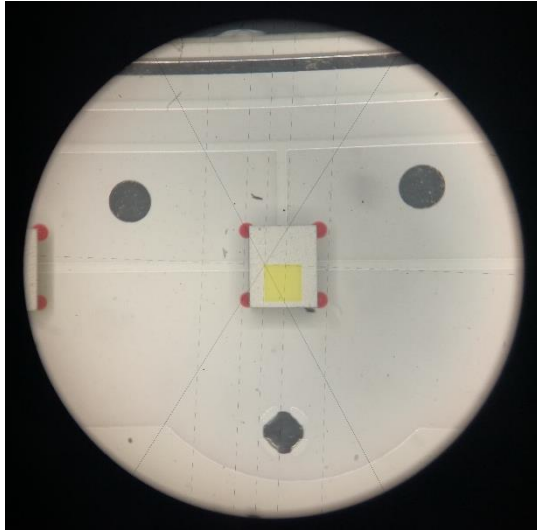
plošných spojů a proměření poloh napájených LED čipů. Na Obrázek 34 jsou vyfoceny PCB zmíněných modelů.

K měření poloh jsme použili modernizovaný dílenský mikroskop Zeiss, na kterém je také připevněna kamera. Pro odečítání poloh na osách je použito lineární vedení, které je propojené s počítačem. Pomocí programu M2Dwin lze zaznamenávat x-ové a y-ové souřadnice a tyto body dále vyhodnocovat – prokládat křivky, kružnice, osy a měřit jejich velikosti a vzdálenosti.

K dispozici jsme měli pouze omezený počet světel – model A 5x, model B 4x a model C 3x – proto jsme nemohli pro vyhodnocení takového malého souboru dat využít silné metody statistiky. Pro výpočet směrodatné odchylky jsme použili opravný koeficient k_n , kterým jsme vynásobili rozdíl maximální a minimální změřené hodnoty. Hodnoty koeficientů pro různé počty měření jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 8 – Dean-Dixonův koeficient k_n [43]

Počet měření n	3	4	5	6	7
Koeficient k_n	0,591	0,486	0,43	0,395	0,37



Obrázek 35 - Dílenský mikroskop

Důležitým bodem měření bylo určit základnu, od které se bude měření provádět. U modelů A a B zajišťují středění PCB na chladiči čepy, na které se deska nasune a přilepí teplovodivou pastou. Tyto otvory tedy přímo určují výslednou pozici sady LED čipů, proto jsme je určili jako základny. U modelu C tyto čepy na chladiči chyběly a nenalezli jsme žádný pomocný mechanismus seřizující polohu PCB desky vůči chladiči. Tuto odlišnost považujeme za nedostatek a jako možný zdroj větších nepřesností. U tohoto modelu jsme jako základnu určili jeden otvor v PCB pro čep primární optiky.

Měřené body jsme umístili do rohu oblasti vyzařující světlo (na Obrázek 35 vlevo – záměrný kříž). Zaznamenávali jsme dvě měření – od společné základny a řetězové měření, u kterého jsme brali v úvahu polohu předchozí LED diody. Z principu práce osazovacích strojů budeme ale dále uvažovat měření od společné základny.

Protože nás zajímá mezní stav soustavy, vybereme maximální hodnoty směrodatných odchylek. Ty jsou uvedeny v Tabulka 9.

Tabulka 9 – Maximální hodnoty směrodatných odchylek

	Společná základna	Řetězové měření
Model A	0,028 mm	0,040 mm
Model B	0,048 mm	0,058 mm
Model C	0,034 mm	0,052 mm

7.2 Usazení LED vůči reflektoru

Kromě samotné pozice LED čipu na desce plošných spojů je také velice důležitý způsob vyměření správné pozice vůči reflektoru. Nejlepším způsobem je využití kinematického uložení, které odebere desce všechny stupně volnosti bez navození stavu neurčitosti. To je nejčastěji realizováno dvojicí děr – kruhovou a oválnou – jak je znázorněno na Obrázek



Obrázek 36 – Vymezení pozice PCB vůči reflektoru

36. Kruhová díra odebírá pohyb podél osy x a y a oválná zamezuje rotaci kolem osy z, budeme-li uvažovat kartézský systém souřadnic.

Nepřesnost takového uložení spočívá ve velikosti vůle mezi kruhovou dírou a kolíkem reflektoru. Pro běžná uložení s vůlí se vůle dle Strojnických tabulek pohybuje v malých jednotkách setin milimetru. Například uložení H7/f7 má maximální hodnotu vůle 34 μm a minimální 11 μm . Protože uvažujeme polohu od středu kolíku, musíme počítat s poloviční hodnotou. Ta se tedy rovná pro toto uložení 17 μm .

Změřená vůle soustavy uvedené na Obrázek 36 vyšla 0,02 mm.

7.3 Součet chyb

Téměř každý zdroj chyb působí na jinou část soustavy reflektoru a má různě veliký vliv na výslednou světelnou stopu. Nelze je proto jednoduše sčítat. Rovněž nejde hodnotit stejným způsobem dva reflektorové systémy odlišných konstrukcí. Protože nemáme k dispozici ostrá data konstrukce, držíme se obecných předpokladů a zjednodušení. Naším cílem je převést tyto těžko realizovatelné zdroje a určit maximální hodnotu vychýlení zdroje světla vůči reflektoru, abychom mohli simulacemi vyjádřit, co se bude se světelným kuželem dít.

Abychom se nejvíce přiblížili reálnému chování nepřesností, uvažované zdroje chyb jsme rozdělili do dvou skupin. Do první skupiny jsme zahrnuli vlivy, které budou mít za

následek pohyb zdroje světla v rovině PCB. Druhá skupina ovlivní pozici LED v ose kolmé na PCB.

V úvahu bereme tyto zdroje: nepřesnosti výsledného reflektoru, teplotní roztažnost materiálů, nepřesnost osazení LED, vymezení vůle mezi reflektorem a PCB.

Číselně jsme tyto vlivy vyjádřili následovně:

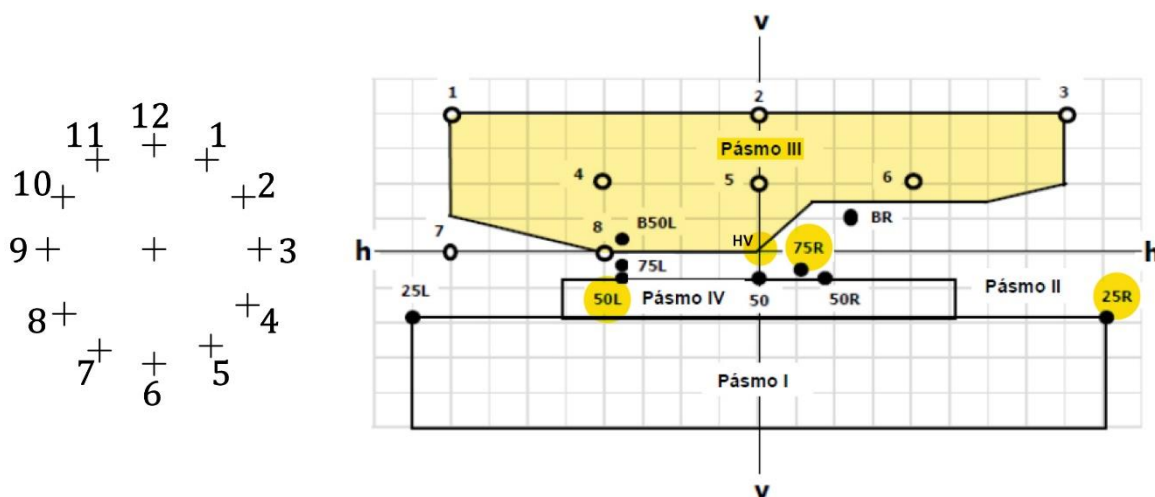
- celková nepřesnost reflektoru: 0,2 mm;
- teplotní zatížení materiálu: 0,2 mm;
- osazení LED: 0,1 mm;
- vůle mezi PCB a reflektorem: 0,05 mm.

Do první skupiny jsme zahrnuli vliv nepřesného osazení LED, vůli mezi PCB a reflektorem před její vymezení a nepřesnost reflektoru. Výsledná hodnota tedy je 0,35 mm. V druhé skupině uvažujeme teplotní zatížení materiálu – teplotní roztažnost. Velikost uvažované chyby druhé skupiny je 0,2 mm.

8 Simulace

Provedená analýza vychází ze zjednodušení, které u reálných systémů zcela neplatí. Tenká čočka nenahrazuje reálnou čočku a reflektory netvoří jedna ideální parabola. U reflektorů se například používají více fasetové multifokální systémy. I tak ale můžeme vyzorovat trendy, které se do realizace promítnou. Při návrhu osvětlení se používají optické programy pracující s geometrií reflektoru či čočky a zdrojem světla. Jedním takovým je LucidShape. Před tím, než se spustí výroba a testování světel, upravuje se počítačový CAD model dle optických simulací, aby se dosáhlo správného rozložení světla. Světelné zdroje jsou matematicky popsány a uloženy ve formátu .ray, který vyvinula skupina Synopsys. Obsahuje miliony vektorů paprsků, které mají svou vlastnost jako vlnovou délku, světelný tok a jiné. Používají se při simulacích účinků světla s povrchy, návrhu solárních panelů nebo právě při osvětlení interiérů či automotive. [44]

Pro simulaci jsme použili vzorové multifokální reflektory s ohniskovými vzdálenostmi 20 mm pro reflektor tvořící spot a 18 mm pro reflektor předpolí. Jako zdroj světla je zde použit LED dvojčip se světelným tokem 550 lm. Postupně jsme se zdrojem světla pohybovali do dvanácti bodů ve třech rovinách. První rovina leží v rovině výchozího světelného zdroje – označujeme ji jako „0“. Další dvě roviny jsou s touto rovnoběžné a od ní vzdálené o 0,2 mm. Tu, která leží blíže k reflektoru, označujeme „+“ a rovinu vzdálenější „-“ (Obrázek 38). Rozložení bodů je znázorněno na Obrázek 37 vlevo. Znázorněné body



Obrázek 37 – Označení vychýlených bodů (vlevo), zvýraznění hodnotících parametrů na světelné mapě (vpravo).

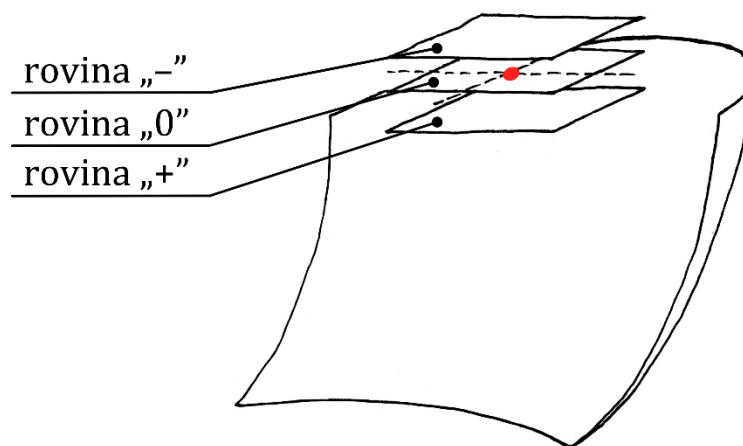
jsou od výchozí – středové polohy vzdáleny o 0,35 mm. Označení těchto bodů budu používat i na následujících grafech. Pro každé vychýlení zdroje jsme po simulaci získali světelnou mapu. Popis jejích os je v úhlech. Na barevném měřítku pod mapou je

odstupňována hodnota svítivosti jednotlivých bodů mapy. Protože potkávací funkce je realizována dvěma reflektory, součtem map z obou reflektorů získáme výslednou celkovou mapu. Na ni lze aplikovat přednastavenou analýzu předpisu ECE 112. Podle této analýzy se vyhodnocují body a oblasti předepsané touto normou, zda plní nebo neplní předpis.

Protože je vyhodnocujících parametrů 23, určili jsme 5 z nich, které bývají nejvíce problematické. U některých parametrů je předepsána maximální hodnota svítivosti, která se nesmí překročit, u některých hodnota minimální, která nesmí být podkročena.

Vyhodnocující parametry jsou následující:

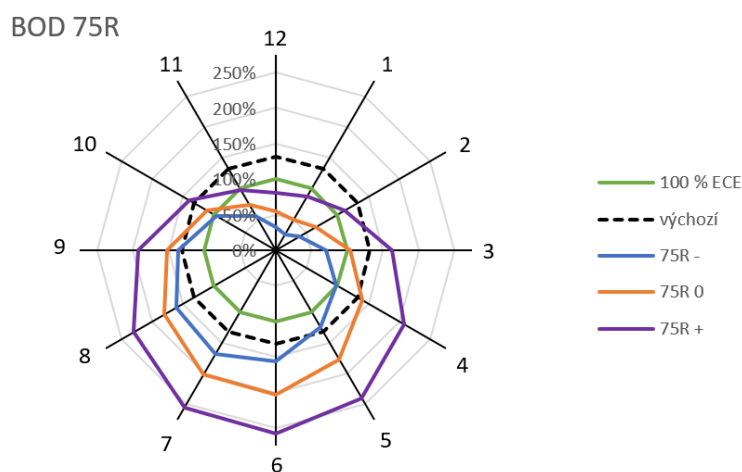
BOD / OBLAST	PŘEDPIS ECE 112
Bod 75R	minimální hodnota 10100 cd
Bod 50L	maximální hodnota 13 200 cd
Bod 25R	minimální hodnota 1700 cd
Bod HV	maximální hodnota 625 cd
Oblast ZIII	maximální hodnota 625 cd



Obrázek 38 – Schéma tří zvolených rovin označených „-“, „0“ a „+“

8.1 BOD 75R

Bod 75R odpovídá místu na vozovce vzdálený 75 m od automobilu. Norma v tomto místě předepisuje minimální hodnotu svítivosti. Na jednotlivá ramena paprskovitého grafu (Obrázek 39) jsou naneseny získané hodnoty svítivosti při odpovídajícím vychýlení zdroje světla. Tyto stavy spojuje modrá křivka – pro rovinu „-“, oranžová křivka – pro rovinu „0“ a fialová křivka – pro body v rovině „+“. Černá čárkovaná čára znázorňuje výchozí stav, tedy hodnotu svítivosti pro nevychýlený světelný zdroj. Zelená vyjadřuje předepsanou minimální svítivost. Z grafu můžeme vyčíst, že pro polohy od bodu 11 do bodu 4 neplní některé z nich předpis. Svítivost klesá až na 30 % požadované hodnoty. Nejhorší případy jsou pro body v rovině „-“. Svítivost ale také pro některé body roste, a to až o 160 %.

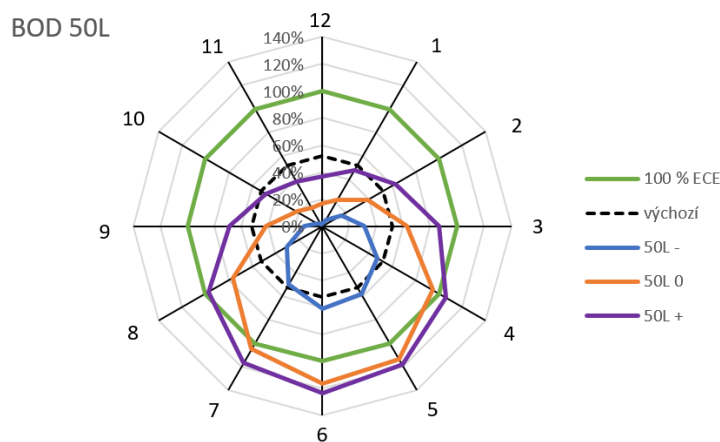


Obrázek 39 – Paprskový graf pro bod 75R

8.2 BOD 50L

Bod 50L se nachází pod bodem 75L a vyjadřuje hodnotu svítivosti na levé krajnici 50 m od automobilu. Je umístěn do světelného vertikálního gradientu. V této oblasti je požadováno velké osvětlení bez oslnění protijedoucích vozidel. To právě zajišťuje tento gradient svítivosti, jehož oblast největší změny musí ležet pod horizontálou (h-h). Předpis pro tento bod stanovuje maximální přípustnou hodnotu svítivosti. Křivka změřených svítivostí musí tedy ležet uvnitř zelené křivky (Obrázek 40), která vyjadřuje maximální povolenou svítivost. Černá čárkovaná křivka vyjadřuje hodnotu svítivosti nevychýleného zdroje. Z grafu je patrný nárůst svítivosti pro pozice 3 až 8 ve všech rovinách. Z toho lze usoudit, že se bude pro tyto polohy zvyšovat poloha gradientu až dojde k oslnování.

Svítivosti s vychýlením do bodů 4 až 7 v rovinách „0“ a „+“ už jsou mimo předepsanou hodnotu.

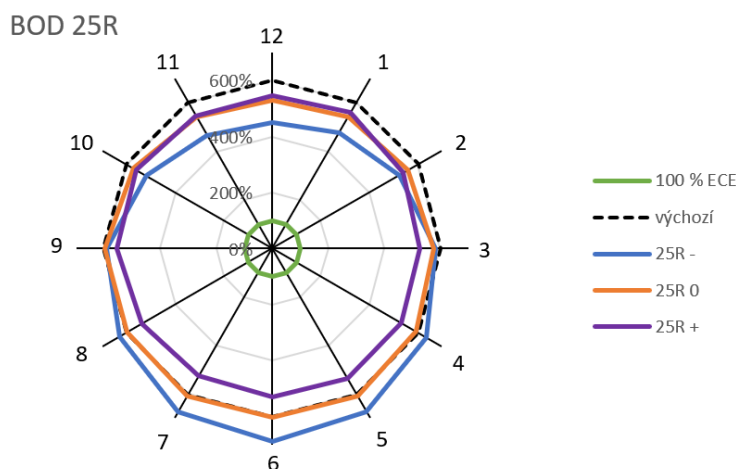


Obrázek 40 – Paprskový graf pro bod 50L

8.3 BOD 25R

Dalším bodem je 25R, který se nachází v pravém horním rohu Pásma I a není v blízkosti ostrého světelného rozhraní. Předpis ECE 112 v tomto bodě předepisuje minimální hodnotu svítivosti 1700 cd. Zelená křivka v grafu (Obrázek 41) vyjadřuje tuto mez. Hodnota svítivosti všech vychýlených poloh zdroje leží vně tuto oblast. Tedy tento bod splňuje předpis ve všech polohách. Největší úchylnka je v bodě 12 v rovině „-“ a hodnota této svítivosti je o 150 % menší než pro nevychýlený zdroj. Tvary křivek (modrá, oranžová, fialová) nevykazují výrazné skokové změny hodnot svítivosti.

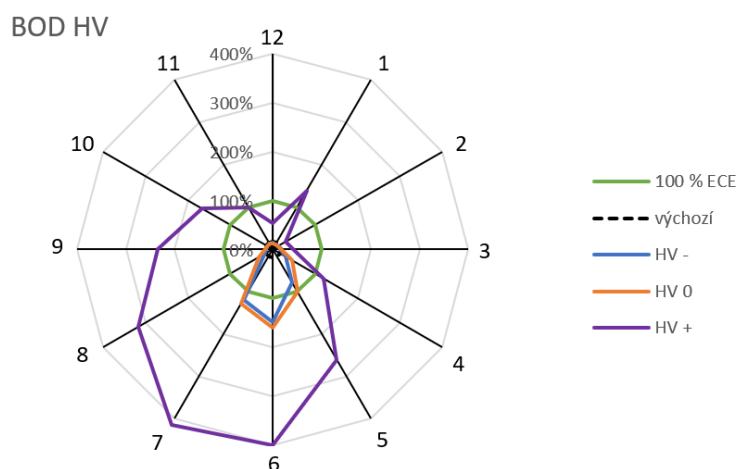
Vychýlení zdroje světla od své výchozí polohy tedy nebude pro tento bod kritické.



Obrázek 41 – Paprskový graf pro bod 25R

8.4 BOD HV

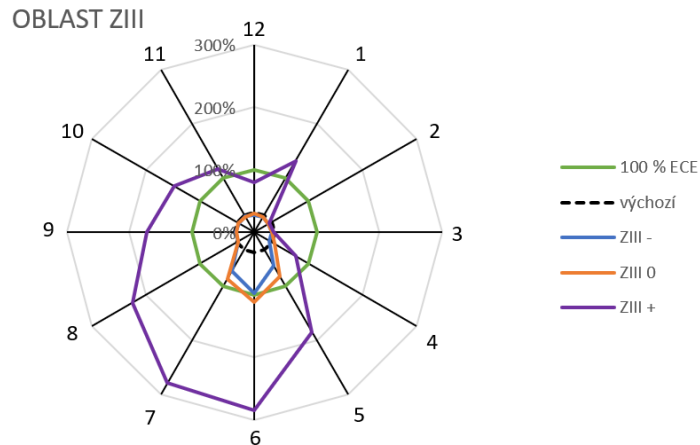
Bod HV leží na průsečíku horizontály (h-h) a vertikály (v-v). Do tohoto bodu nesmí zasahovat gradient svítivosti ležící pod h-h křivkou ani v oblasti zvedajícího se kinku. Maximální předepsaná hodnota je v tomto bodě 625 cd. Z grafu na Obrázek 42 usuzujeme, že hodnota svítivosti je velice ovlivněna směrem vychýlení zdroje. Nárůst svítivosti nad stanovenou mez je zřejmý především pro vychýlení zdroje do bodů 5, 6 a 7. Světelné rozhraní se zvedá až tak, že v bodě HV měříme 4x vyšší hodnotu, než je předepsaná normou (pro bod 7 v rovině „+“).



Obrázek 42 – Paprskový graf pro bod HV

8.5 OBLAST ZIII

Oblast ZIII má tvar mnohoúhelníku a nachází se nad horizontálou. Od bodu HV se její strana zvedá směrem vpravo pod úhlem 45°, kde je kink, a horní část je omezena úsečkou umístěnou 4° nad křivku h-h. ZIII obsahuje dalších 8 bodů, které se hodnotí vlastním kritériem. Mezi ně patří i HV. Od zmiňovaných bodů liší principem vyhodnocování. V žádném bodě oblasti nesmí být překročena hodnota 625 cd, aby nedošlo k oslňování. Hodnoty maximální svítivosti pro dané výchylky zdroje jsou uvedeny v grafu na Obrázek 43. Body v rovinách „-“ a „0“ splňují předpis kromě polohy zdroje v bodě 6 v rovině „0“. Zdroje umístěné v rovině „+“ ve většině případů překračují maximální přípustnou hodnotu. Největší svítivost jsme zaznamenali v bodě 6 a zvedla se o 180% proti normě. Mezi polohami 4 až 9 bylo místo největší svítivosti v těsné blízkosti bodu HV. U ostatních případů se toto místo vyskytovalo spíše kolem dalších částí spodního ohraničení oblasti ZIII. Pro zdroje v této rovině tedy dochází k výraznějšímu zvedání světelné stopy, než je tomu u ostatních dvou rovin.



Obrázek 43 – Paprskový graf pro oblast ZIII

8.6 Shrnutí

Vychýlení zdroje světla ze své výpočtové polohy deformuje rozložení osvětlení. Z provedených simulací je patrné, že každý vyhodnocovaný bod předpisem pro potkávací funkci je jinak citlivý na tyto vychýlení. Lze ale vypořádat určité trendy. První z nich bereme z pohledu vychýlení zdroje světla od výchozí polohy v rámci této roviny. Pro body v polohách 3 až 9 obecně dochází ke zvyšování svítivosti. Protože vyhodnocované body 75R, 50L a HV leží v oblasti blízké světelného rozraní, dochází obecně k vertikálnímu posunu světelné stopy.

Druhý pohled srovnává stejné body z jednotlivých rovin. Obecně lze z provedených simulací vyvodit, že změna pozice zdroje světla směrem od reflektoru (rovina „-“) snižuje svítivost ve sledovaném bodě. Naopak posunem zdroje světla směrem k reflektoru (rovina „+“) dochází ke zvyšování svítivosti. U některých bodů se zvyšuje rychleji, u některých pomaleji.

9 Návrh experimentu

Pomocí provedených simulací jsme zjistili, že některé body předepsané normou jsou daleko více citlivé na nepřesné umístění zdroje světla než jiné body. A to uvažujeme-li pouze odchylky způsobující vzájemnou nepřesnost polohy LED a reflektoru. K ověření těchto výsledků navrhujeme experiment na reálné soustavě. Naším cílem je zamyslet se nad různými přístupy k ověření výsledků.

Důležitým pojmem, který si musíme na začátku definovat, je „ideální“ poloha zdroje světla u reálného světlometu, tedy LED. Nabízejí se nám dvě varianty. Je to poloha, ze které dostaneme nejpodobnější světelnou stopu ideální světelné simulaci? Nebo za ideální prohlásíme právě tu polohu sestavenou z výroby? Záleží na tom, co budeme experimentem sledovat. Půjde-li nám o kvantitativní ověření simulací, budeme za „ideální“ polohu považovat tu nejbližší odpovídající simulaci, která má zdroj ve výchozí poloze. Je to ta obtížnější cesta, neboť po každém posunutí zdroje bude následovat proměření světelné mapy, minimálně v některých důležitých oblastech u rozhraní kolem horizontály, a porovnání se simulací.

Budeme-li zkoumat citlivost soustavy, bude nám dostačovat zjednodušení, při kterém „ideální“ polohou nazveme právě tu vzájemnou polohu PCB a reflektoru, která bude určena výrobou.

Prvním a společným krokem obou postupů je dostat se k PCB, protože vstupním objektem je kompletní přední světlomet. Nejvhodnějším prostředkem pro odřezávání částí těla světlometu je ultrazvukový nůž. Lze s ním snadno řezat otvory, odřezávat části a poradí si i s tmeleným spojením čelního skla. Protože se konstrukce u různých modelů liší, nebudeme tento krok dále detailněji popisovat. Předpokládáme volný prostor pro manipulaci kolem PCB.

Dále navrhujeme dva možné přístupy:

9.1 První přístup

Základním principem první metody je uchycení PCB se zdroji světla k pohyblivým stolkům ve třech osách. Důležitým krokem je uvolnění PCB, aby s ním mohlo být pohybováno. Princip ustavení zdroje světla vůči reflektoru již bylo zmíněno v kapitolách výše. Navíc je ještě přichyceno několika šrouby do těla reflektoru. Znalost původní polohy nám může výrazně zjednodušit výsledné vyhodnocování světelné mapy.

K uvolnění PCB je tedy zapotřebí zbavit se šroubů a ustavovacích kolíků. Protože chceme po vychýlení zdroje o stanovenou délku změřit změnu světelné distribuce, upevňujeme světlomet na stolek goniometru.

Potřebné pomůcky:

- ultrazvukový nůž;
- reflektor s přípravkem na uchycení na stůl goniometru;
- dva pohyblivé stolky s mikrometrickými šrouby (1 s pohybem x-y, 1 s pohybem v ose z);
- přípravek na uchycení PCB;
- vrtačka s vrtákem;
- modulární stavebnicové díly pro vyrovnání výškových rozdílů.

V prvním kroku odstraníme kolíky. To provedeme odvrtáním vrtákem vhodné velikosti do potřebné hloubky. Je vhodné během procesu odstraňovat vzniklé špony a odpadní materiál. Šrouby jsou po celou dobu utažené. Následně upevníme na stůl ze zadní strany světlometu posuvné stolky. Jako první ustavíme stolek s vertikálním posuvem. Dále na něj upevníme kombinaci spojových stavebnicových dílů a x-y stolek přibližně tak, aby horní část byla ve shodné výšce jako PCB. Dbáme na to, aby jedna z os měla stejný směr jako směr vystupujícího záření.

Stolky s mikrometrickým šroubem byly zvoleny proto, že jsou cenově dostupné a jejich přesnost pohybující se od 0,01 mm je pro náš požadavek naprosto dostačující. Příklady takovýchto stolků jsou uvedeny níže.



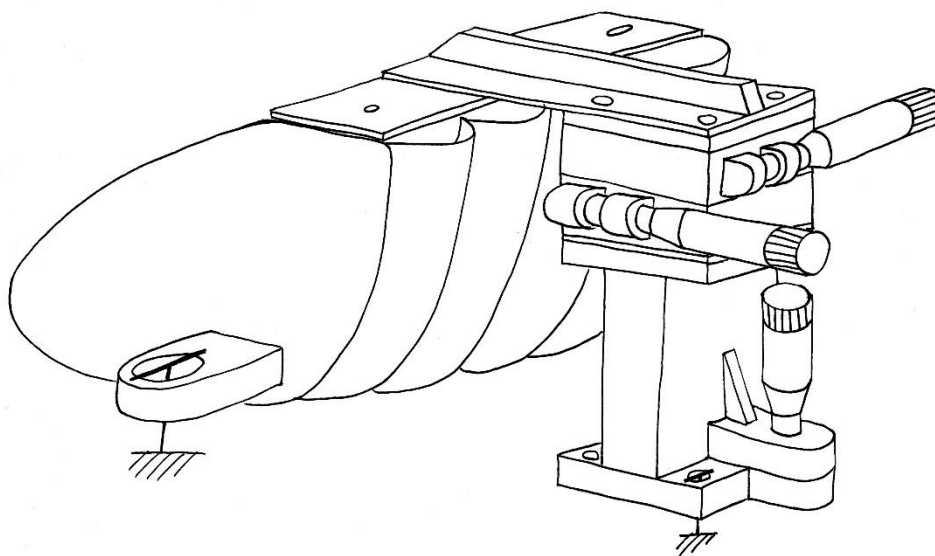
Obrázek 44 – Stolek s mikrometrickým posuvem v ose z [45]



Obrázek 45 – Stolek s mikrometrickým posuvem v osách x a y [46]

Dalším krokem je spojení PCB s pracovní plochou posledního ze stolků za pomoci vhodného dílu. Vhodným myslíme dostatečně tuhý s takovými rozměry, aby ani při pohybování nedocházelo ke kolizím s tělem světlometu. Spojení se stolkem je realizováno pomocí šroubů. Uchycení na straně PCB je realizováno lepeným spojem. Je třeba se vyhnout vnesení pnutí, které by po uvolnění vychýlilo PCB. Jakmile lepidlo zaschne můžeme uvolnit zdroj světla odšroubováním šroubů.

Dostáváme volné PCB spojené se systémem umožňující pohyb ve všech třech kartézských souřadnicích.



Obrázek 46 – Schématický náčrt uspořádání prvního přístupu

9.2 Druhý přístup

V druhém přístupu určujeme pozici LED nepřímou. To znamená, že nebereme v potaz původní polohu zdroje, ale ten následně umístíme do zjištěné polohy. Tento způsob je náročnější na potřebné vybavení. Kromě prostoru pro pohyb kolem PCB je také nutné sejmutí krycího skla.

Potřebné pomůcky:

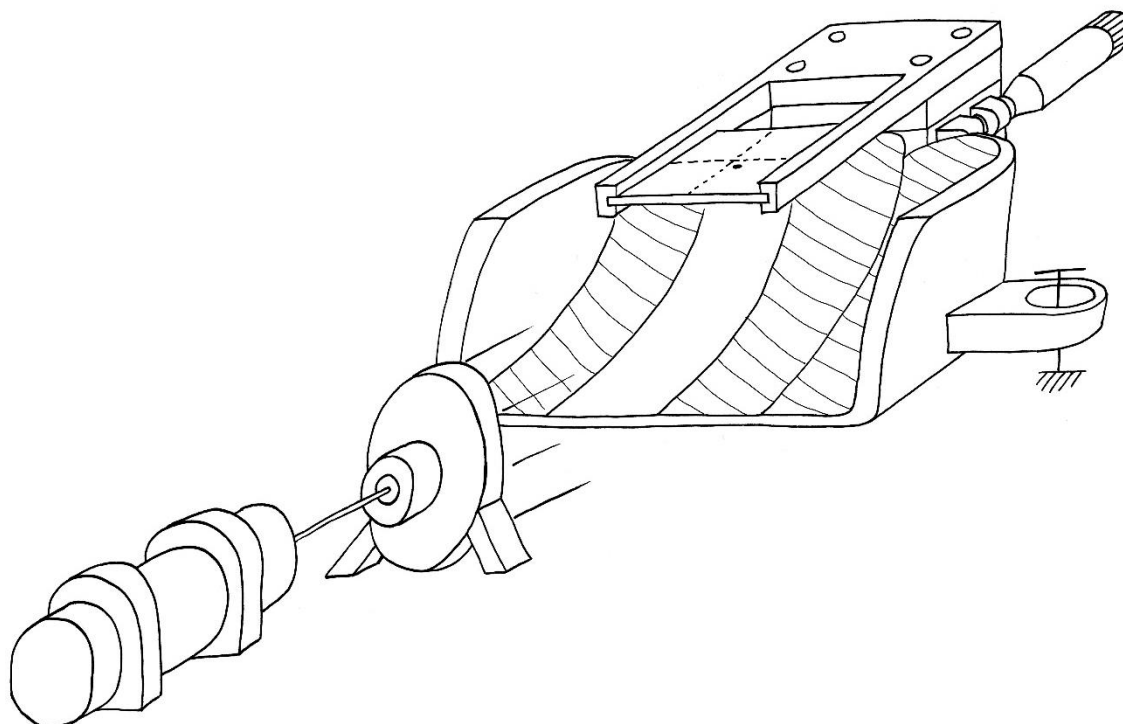
- ultrazvukový nůž;
- reflektor s přípravkem na uchycení na stůl goniometru;
- dva pohyblivé stolky s mikrometrickými šrouby (1 s pohybem x-y, 1 s pohybem v ose z);
- matnice se záměrným křížem;
- přípravek na uchycení PCB a matnice;
- modulární stavebnicové díly pro vyrovnání výškových rozdílů;
- laser;
- rozšiřovač laserového svazku;
- matná páska na zakrytí faset.

V principu jde o hledání ohniska reflektoru. Ten však nemá jedno ohnisko, neboť se jedná o multifokální systém. Proto postupně hledáme místo fokusu jednotlivých faset pomocí laserového svazku a matnice se záměrným křížem. V prvním kroku upevníme ze zadní strany reflektoru stolky s mikrometrickým posuvem stejně jako u prvního přístupu. Tedy na stolek s pohybem v ose z připevníme pomocí stavebnicových dílů x-y stolek. Rovina horního stolku výškově přibližně odpovídá rovině PCB. Odmontujeme PCB a na jeho místo upevníme matnici. Ta je vhodně spojena ramenem, které je přimontováno na horní posuvný stolek. Odměříme pozici hlavního středícího kolíku, na který se nasazuje kulatá díra PCB (Obrázek 36 vlevo).

Sestavíme laserový systém. Skládá se z laseru a rozšiřovače laserového svazku. Osa laserového svazku se musí shodovat s optickou osou čoček rozšiřovacího systému. Na jeho výstupu dostáváme kolimovaný svazek, jehož průměr osvítí celou plochu faset. Všechny fasety kromě jedné proměřované zakryjeme matnou páskou. Ze simulací víme, do jakého směru tato konkrétní faseta svítí a do místa největší intenzity umístíme laser. Pohybem matnice určíme bod fokusu. Postup opakujeme pro všechny fasety a zaznamenáváme souřadnice fokusovaných poloh. Polohu LED určíme z geometrického

středu obrazce, který vznikne spojením naměřených bodů. Tím dostáváme „ideální“ polohu zdroje.

Výměnou matnice za PCB můžeme pomocí stolku vychylovat zdroj světla a zkoumat změny ve světelné mapě.



Obrázek 47 – Schématický náčrt uspořádání druhého přístupu

9.3 Zhodnocení

Navržené postupy mají rozdílný přístup a s tím spojenou rozdílnou náročnost co do vybavení a co do časové náročnosti. Oba počítají s řezáním a odstraňováním různých dílů světlometu. První metoda je snadněji proveditelná. Její slabá místa spatřujeme ve třech prvcích. Za prvé se vlivem vrtání může hnout s reflektorem. Druhé místo je dodržení rovnoběžnosti stolku s osou reflektoru. Poslední částí je vnesení pnutí a vychýlení zdroje během lepení.

Druhá metoda zahrnuje více kroků, a tedy výskyt více možných rušivých vlivů. Prvním místem je osvětlování fasety pouze z jednoho směru a kolimovaným svazkem. To principiálně nedopovídá skutečnosti. Další kritickým bodem je obtížné nastavení LED do změřené polohy. V tomto kroku si musíme pomoci proměřením polohy zdroje světla vůči ustavovacím otvorům. Je proto velice pravděpodobné, že výsledky tohoto přístupu nebudou dostačující. Proto tento postup hodnotíme jako dražší a méně spolehlivý.

Porovnáním obou přístupů doporučujeme první z nich.

10 Závěr

Nezbytnou součástí každého automobilu je osvětlovací soustava, která plní různé světelné funkce a je realizována světlomety a svítilnami. V této práci se zaměřujeme na světlomet potkávací funkce a na samotnou světelnou stopu. Její tvar a světelná distribuce jsou definovány mezinárodními předpisy. Cílem této práce bylo popsat zdroje nepřesností vzniklé výrobou či sestavením dílů a jejich vliv na světelnou mapu.

Toleranční řetězec jsme rozdělili na dvě větve – na vlivy elektrické, které jsme více nezkoumali, a vlivy mechanické, které byly naší hlavní oblastí zkoumání.

V první části jsme se zaměřili na zmapování výrobní technologie plastových dílů – vstřikování plastů, protože naprostá většina hlavního světlometu je vyrobena z plastu. Tato technologie je velice komplexní obor. Kromě vlastností použitého materiálu hraje velkou roli konstrukce dílu, vlastní provedení formy, technologické parametry během procesu vstřikování nebo vliv prostředí.

V další části jsme se zabývali samotným zdrojem světla. V současné době jsou žárovky a výbojky vytlačovány dobře zvládnutou technologií LED. S tímto zdrojem můžeme navyšovat světelný výkon, spolu se snadnou regulací a rychlou odezvou tvořit složité MATRIX systémy, nebo využít designový potenciál formou dynamických signálních funkcí, „welcome efektů“ či prostých světlovodů. Protože se většinou používají společně ve větším počtu, musí vykazovat velice podobné, ideálně shodné, vlastnosti. Podle nich se LED dělí do skupin zvaných binning. Avšak i použití LED z jedné skupiny může být zdrojem odchylek.

V další části jsme se zaměřili na osazování LED. Provedli jsme měření PCB třech modelů značky Škoda na dílenském mikroskopu.

V kapitole Optická analýza jsme se zaměřili na demonstraci vlivu nepřesné vzájemné pozice LED a optického systému. Také jsme srovnali tyto vlivy pro systémy s různou ohniskovou vzdáleností. Výsledkem byly grafy vyjadřující nárůst úhlových odchylek při zkracování ohniskových vzdáleností. Také jsme graficky znázornili proměnlivost citlivosti parabolické plochy podél křivky.

Získané poznatky jsme rozdělili na čtyři případy, které jsme vyjádřili kvantitativně a které jsme použili do následné simulace na zkušebním modelu reflektoru. Tyto případy byly: celková nepřesnost reflektoru, teplotní zatížení, usazení LED a vymezení vůle mezi PCB a reflektorem. Výsledné hodnoty použité do simulací vyjadřující nejnepříznivější stavy byly posun v rovině PCB o 0,35 mm a posun v ose kolmé na PCB o $\pm 0,2$ mm.

Výsledkem simulací byly grafy pro 5 vybraných parametrů světelné mapy, které jsou předepsány předpisem ECE 112. Zjistili jsme, že posun zdroje světla ve směru kolmém na PCB k reflektoru byl vzhledem k předpisu více problémový než ve směru od reflektoru. Také pohyb v rovině zdroje světla byl v určitých směrech problémovější.

V poslední kapitole jsme navrhli dva možné přístupy k ověření simulací na reálných hlavních světlometech. Důležitým bodem bylo definování ideální polohy v reálné soustavě. Zhodnocením jednotlivých metod po stránce možných zdrojů chyb a složitosti jsme doporučili k provedení první metodu. Ta spočívá v připevnění volného PCB ke stolkům s mikrometrickým odměřováním a měření světelné stopy.

Toleranční analýza je velice komplexní téma, jež by si zasloužilo další zkoumání nad rámec této práce. Jaké je rozložení teplotního pole? Jak konstrukce reaguje na tyto změny teploty? Do jaké míry odpovídá matematické popsání zdroje světla realitě? Jaké vlivy má rozdílná tloušťka krycího skla na světelnou stopu?

11 Použitá literatura

- [1] *Automotive: Nejdůležitější odvětví českého hospodářství* [online]. [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <https://www.studenta.cz/poweredyexperts/automotive-nejdulezitejsi-odvetvi-ceskeho-hospodarstvi/r~st:article:3366/>
- [2] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. 2016 [cit. 2020-03-12]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/01.html>
- [3] *Lineární teplotní roztažnost materiálů* [online]. [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/linearni-teplotni-roztaznost-mateialu>
- [4] *Termoplasty – popis druhů, jejich vlastností a využití. Koplast* [online]. [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <https://www.koplast.cz/ostatni-termoplasty-popis-termoplastu/>
- [5] *Refractive index: Refractive index database* [online]. [cit. 2020-08-14]. Dostupné z: <https://refractiveindex.info/?shelf=3d&book=plastics&page=pc>
- [6] *Plexisklo – Polymethylmetakrylát (PMMA) - technické aspekty. Koplast* [online]. [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <https://www.koplast.cz/plexisklo-popis-plexiskla/>
- [7] *ABS (Akrylonitrilbutadienstyren) - vlastnosti a použití. Koplast* [online]. [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <https://www.koplast.cz/abs/>
- [8] *ABS – technické vlastnosti. VM Plast* [online]. [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <https://www.vmplast.cz/sortiment/abs>
- [9] LENFELD, Petr. *Technologie vstřikování* [online]. 2016. [cit. 2020-03-12]. ISBN 978-80-88058-74-8. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/01.html>
- [10] *Plastikcity* [online]. In: . 29. 11. 2014 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <https://plastikcityuk.wordpress.com/2014/11/29/injection-moulding-greater-part-of-the-auto-producing-organisations-utilise-this-injection-moulding-a-great-deal/>
- [11] *Vstřikování plastů* [online]. [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm
- [12] *Smrštění a dodatečné smrštění při vstřikování plastů* [online]. 2015 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <https://www.techportal.cz/33/smrsteni-a-dodatecne-smrsteni-pri-vstrikovani-plastu-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EqQUkSFod1GxXa2VafSdbW0/>

- [13] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe* [online]. Praha, 2018 [cit. 2020-03-07]. ISBN 978-80-247-2819-3. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=uExtDwAAQBAJ&pg=PA78&lpg=PA78&dq=vli+v+navlhavosti+plast%C5%AF+na+jeho+rozm%C4%9Br&source=bl&ots=CP9QejwI7T&sig=ACfU3U1Dzv3CAvaMLeAJViLbEifHmnYcZQ&hl=cs&sa=X&ved=2ahUK Ewii4On0se3hAhW6RhUIHa11DHIQ6AEwC3oECAGQAQ#v=onepage&q=vliv%20navlhavosti%20plast%C5%AF%20na%20jeho%20rozm%C4%9Br&f=false>
- [14] BOBEK, Jiří. *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů* [online]. 2016 [cit. 2020-03-12]. ISBN 978-80-88058-65-6. Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/01.html>
- [15] JÍLEK, Bohumil. *Výroba vstřikovací formy*. Brno, 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie.
- [16] ŽLEBEK, Michal. *Osvětlení automobilu*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav.
- [17] *Vývoj a konstrukce světlometů ŠKODA AUTO a.s.* [online]. In: . [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/20229404-Vyvoj-a-konstrukce-svetlometu-skoda-auto-a-s.html>
- [18] OTT, Michal. *Naprašování a napařování vodivých vrstev*. Praha, 2018. Bakalářská práce. ČVUT Fakulta elektrotechnická.
- [19] *Vakuové depoziční aparatury* [online]. [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <http://kmf.troja.mff.cuni.cz/okno/vyzkum.php?idv=39>
- [20] *Fimetrics: Reflectance Calculator* [online]. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: <https://www.fimetrics.com/reflectance-calculator>
- [21] PBT Rožnov p. R.: *Pájecí pece* [online]. [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <https://www.pbt.cz/cz/produkty/pajeni/pajeci-pece>
- [22] MIŠKAŘÍK, Stanislav. *Moderní zdroje světla*. Praha: SNTL, 1979.
- [23] JEOL: *Light-bulb filament* [online]. [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://www.jeol.co.jp/en/applications/myu/detail/1476.html>
- [24] *Přehled, výhody, nevýhody a zapojení výbojek* [online]. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.mylms.cz/prehled-vyhody-nevyhody-a-zapojeni-vybojek/>
- [25] KHAN, T. Q., P. BODROGI, Q. T. VINH a H. WINKLER. *LED Lighting: Technology and Perception*. 2015. ISBN 978-3-527-40933-4.

- [26] El principio de diodos emisores de luz LED [online]. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <http://forofilo.net/index.php?topic=303.0>
- [27] How products are made: *Light-Emitting Diode* [online]. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <http://www.madehow.com/Volume-1/Light-Emitting-Diode-LED.html>
- [28] High-Brightness LED manufacturing: *Application with Nanoimprint Technology TOSHIBA MACHINE* [online]. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=7MxhIBgqR4g>
- [29] *Photometric & optical testing: LED Colour Difference Metrics: SDCM & MacAdam Ellipses* [online]. [cit. 2020-08-10]. Dostupné z: http://www.photometrictesting.co.uk/File/blog_LED_colour_difference.php
- [30] *LEDco: Štandardná odchýlka farieb LED diód SDCM (Mac Adamova elipsa)* [online]. [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: <https://shop.ledco.sk/standardna-odchylka-farieb-led-diod-sdcm-mac-adamova-elipsa/>
- [31] *LEDnique: Variations in Vf and "binning"* [online]. [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: <http://lednique.com/current-voltage-relationships/variations-vf-binning/>
- [32] *OSRAM Datasheet: KW CELNM1.TG* [online]. [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: https://dammedia.osram.info/media/resource/hires/osram-dam-6089913/KW%20CELM1.TG_EN.pdf
- [33] EVA, Divišková. *Využití chemiluminiscence ve studiu biooxidace sirných látek*. Brno, 2006. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta, Katedra biochemie.
- [34] *Chemie a světlo: Školní didaktická souprava* [online]. [cit. 2020-02-19]. Dostupné z: <https://www.chemieasvetlo.cz/teorie/chemiluminiscence/>
- [35] *Semiconductor Lasers: An Overview of Commercial Devices* [online]. [cit. 2020-08-14]. Dostupné z: <https://www.photonics.com/Articles/Semiconductor Lasers An Overview of Commercial/a25099>
- [36] *Explainthatstuff!: Semiconductor diode lasers* [online]. [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: <https://www.explainthatstuff.com/semiconductorlaserdiodes.html>
- [37] *Osram-Continental: New headlight technology* [online]. [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: <https://www.osram-continental.com/en/news-trends/laser-light-new-headlight-technology.html>

- [38] Laser Automotive Lighting. In: *Carnorama* [online]. 2014 [cit. 2020-03-12].
Dostupné z: <https://www.carnorama.com/wp-content/gallery/laser-automotive-lighting/laserautomotivelightingv5.jpg>
- [39] *Lamp Spectral Power Distribution Database*. [online]. [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: <http://galileo.graphyics.cegepsherbrooke.qc.ca/app/en/lamps>
- [40] VYSOUDIL, M. *Fotometrie a spektrometrie zapouzdřených LED čipů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 71 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.
- [41] *Luminous Efficacy Tables* [online]. [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/vision/efficacy.html>
- [42] *Instrument System: AMS Goniometer System* [online]. [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: <https://www.instrumentsystems.com/en/systems/ams-goniometer-system/>
- [43] *Elektronická učebnice: Tabulky* [online]. UPOL [cit. 2020-08-06]. Dostupné z: <https://ach.upol.cz/ucebnice/tab3.htm>
- [44] *FilesEmut: .RAY Prípona súboru* [online]. [cit. 2020-08-01]. Dostupné z: <https://sk.filesemut.com/ray-file-extension>
- [45] *Thorlabs: Travel Vertical Translation Stage* [online]. In: . [cit. 2020-08-07].
Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=MVS010/M>
- [46] *Thorlabs: Travel Compact Translation Stages* [online]. In: . [cit. 2020-08-07].
Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=11042

12 Seznam obrázků

Obrázek 1 – Graf vývoje produkce plastů v čase [2]	12
Obrázek 2 – Horizontální hydraulický vstříkolis [10]	18
Obrázek 3 – Průběh tlaku (světle modrá), pohybu šneku (hnědá) a formy (zelená) během procesu vstříkování	19
Obrázek 4 – Schéma vakuové depoziční aparatury pro naprašování (vlevo) a napařování (vpravo) [18]	26
Obrázek 5 – Graf odrazivosti R kovové vrstvy na skleněném substrátu [20]	27
Obrázek 6 – Graf závislosti odrazivosti R hliníkové vrstvy na úhlu dopadu α	27
Obrázek 7 – Typy optických systémů (A – reflektorový, B – projekční, C – světlovodivý)	28
Obrázek 8 – Wolframové vlákno žárovky [21], změny parametrů halogenové žárovky (ϕ – světelný tok, T_e – teplota chromatičnosti, P – příkon, Ž – životnost) [20]	31
Obrázek 9 – Planckův zákon záření černého tělesa pro tři hodnoty teploty	31
Obrázek 10 – Konstrukce výbojky [24]	32
Obrázek 11 – Složení LED diod [26]	33
Obrázek 12 – Diagram CIE 1931 s MacAdamovými elipsami [30]	35
Obrázek 13 – Schéma polovodičového laseru [35].....	39
Obrázek 14 – Princip laserového světlometu společnosti BMW [38]	40
Obrázek 15 – Spektrální vyzařování tří typů zdrojů světla (uvedené intenzity nejsou proti sobě v měřítku) [39].....	41
Obrázek 16 – Směrová charakteristika vyzařování [32]	41
Obrázek 17 – Spektrální citlivost lidského oka [41]	43
Obrázek 18 – Schéma označení veličin.....	43
Obrázek 19 – Goniometr pro automotive [42]	44
Obrázek 20 – Uspořádání členů ve fotometrické laboratoři (a – goniometr, b – fotočlánek, spektrometr, c – kamera, d – projekční stěna, e – fotočlánek, f – retroreflektometr)	45
Obrázek 21 – Předpis pro potkávací funkci ECE112.....	46
Obrázek 22 – Světelný příspěvek jednotlivých reflektorů.....	47
Obrázek 23 – Výsledná světelná mapa obou reflektorů	47
Obrázek 24 – Znázornění deformace světelného svazku vlivem nepřesností (a – ideální stav, b – defokus kladný, c – defokus záporný, d – decentr v ohniskové rovině).....	49

Obrázek 25 – Schématické znázornění deformace světelného svazku pro výchylku podél optické osy (defokus) v závislosti na ohniskové vzdálenosti od požadované polohy	50
Obrázek 26 – Schématické znázornění deformace světelného svazku pro výchylku v ohniskové rovině (decentr) v závislosti na ohniskové vzdálenosti ($c + d$) a v obecné poloze (e)	51
Obrázek 27 – Znázornění znaménkové konvence	52
Obrázek 28 – Graf závislosti p' na f' pro tři hodnoty defokusu x	53
Obrázek 29 – Graf závislosti úhlu beta na f' pro tři výchylky x	53
Obrázek 30 – Chod paprsků u reflektoru v závislosti na pozici zdroje světla	54
Obrázek 31 – Úhlová citlivost paraboly s ohniskovou vzdáleností 10 mm na defokus a decentr o velikosti 0,5 mm	56
Obrázek 32 – Výpočet úhlové odchylky od ideálního paprsku	56
Obrázek 33 – Schéma tolerančního řetězce	57
Obrázek 34 – PCB čipy (a – model A, b – model B, c – model C)	59
Obrázek 35 - Dílenský mikroskop	60
Obrázek 36 – Vymezení pozice PCB vůči reflektoru	61
Obrázek 37 – Označení vychýlených bodů (vlevo), zvýraznění hodnotících parametrů na světelné mapě (vpravo)	63
Obrázek 38 – Schéma tří zvolených rovin označených „-“, „0“ a „+“	64
Obrázek 39 – Paprskový graf pro bod 75R	65
Obrázek 40 – Paprskový graf pro bod 50L	66
Obrázek 41 – Paprskový graf pro bod 25R	66
Obrázek 42 – Paprskový graf pro bod HV	67
Obrázek 43 – Paprskový graf pro oblast ZIII	68
Obrázek 44 – Stolek s mikrometrickým posuvem v ose z [44]	70
Obrázek 45 – Stolek s mikrometrickým posuvem v osách x a y [45]	71
Obrázek 46 – Schématický náčrt uspořádání prvního přístupu	71
Obrázek 47 – Schématický náčrt uspořádání druhého přístupu	73