

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**NÁVRH INTERIÉROVÉHO SVÍTIDLA V TRENDU HUMAN
CENTRIC LIGHTING**

DESIGN OF INDOOR LIGHTING IN A TREND OF HUMAN CENTRIC LIGHTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Filip Ruml

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Antoš, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Filip Ruml
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Výroba automobilových světel a technických svítidel
Vedoucí práce:	Ing. Martin Antoš, Ph.D.
Akademický rok:	2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh interiérového svítidla v trendu Human Centric Lighting

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem této diplomové práce je navrhnout svítidlo, v jehož návrhu budou implementovány nejnovější poznatky z oblasti Human Centric Lighting (dále HCL). Zároveň si práce klade za cíl pojmout problematiku HCL z praktického hlediska a ověřit možnosti jejího využití ve výrobku firmy ROBE. Výsledkem této práce bude nejen výrobní produkt, ale zároveň návrh osvětlení interiéru spolu s analýzou jeho funkčnosti v porovnání s jeho konvenční alternativou.

Diplomová práce by měla blíže prozkoumat stav současného poznání v oblasti vlivu osvětlení na člověka, což definuje pojem Human Centric Lighting. Na základě zjištěných poznatků je smyslem práce navrhnout svítidlo nové generace zaměřeno právě pro použití v interiéru podle teorie HCL.

LED technologie je již léta nedílnou součástí osvětlovacího průmyslu. Příchod LED však vedl k často nedůslednému nahrazování konvenčních zdrojů světla. Zohledňovala se totiž jen jeho energetická účinnost. Množství světla a účinnost byly rozhodujícími parametry, přičemž na kvalitu světla nebyl brán dostatečný zřetel. I s tím, jak se díky rychlému rozvoji LED světel jejich účinnost stále více blíží ke svému teoretickému maximu, se tento trend začíná měnit. Začíná být čím dál důležitější kvalita osvětlení, přirozenost a světelná pohoda pro člověka, který toto osvětlení užívá. K tomuto novému trendu přispěl i objev fotocitlivých buněk ipRGC v lidském oku, jejichž stimulace světlem prokazatelně ovlivňují kognitivní procesy člověka, jeho zdraví a celkové prožívání (Holzman, 2010; The Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks, 2012).

Navrhněte technické svítidlo s použitím pro vnitřní osvětlení ve spolupráci se společností ROBE lighting s.r.o. s ohledem na kvalitu světla a jeho vliv na člověka.

Cíle diplomové práce:

1. Zpracujte teoretický přehled současných poznatků k HCL
2. Ve stěžejní části zabývající se optickým návrhem vytvořte návrh svítidla s ohledem na HCL a finální instalaci svítidel
3. Vytvořte návrh využití svítidla v interiéru
4. Porovnejte návrh osvětlení s konvenčním návrhem z hlediska energetické náročnosti a kvality osvětlení

Seznam doporučené literatury:

WYSZECKI, G. a W. S. STILES. Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae. 3rd ed. USA: John Wiley & Sons, 2000. ISBN 0-471-02106-7.

HABEL, J. Světlo a osvětlování. 2. vyd. Praha: FCC Public, 2013. 622 s. ISBN 978-80-86534-21-3.

HALLIDAY, D., R. RESNICK a J. WALKER. Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky. V Brně: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1868-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

The main tasks of the thesis lie in summary of present state in Human Centric Lighting field, in the optical design of luminaire and in practical verification of the proposal. The design is developed in software LightTools and for the verification of functionality the software Dialux EVO is employed. The luminaire is designed primarily with respect to the influence of light on the man and the physiological, psychological and behavioural responses in humans. The thesis is created in cooperation with the company Robe Lighting s.r.o. The proposal of the luminaire corresponds to the current state of knowledge in the area of light influence on humans. The designed luminaire in the trend HCL is distinguished by the high quality of emitted light but also with higher costs of the operation.

KLÍČOVÁ SLOVA

Luminaire, optical design, LightTools, Dialux EVO, Human Centric Lighting, circadian system.

ABSTRACT

Hlavními částmi jsou shrnutí současného stavu poznání v oboru Human Centric Lighting, optický návrh svítidla v softwaru LightTools a následné ověření funkčnosti navrženého svítidla na konkrétní aplikaci pomocí simulace osvětlení v programu Dialux EVO. Tato práce si klade za cíl vytvořit svítidlo primárně s ohledem na vliv světla na člověka a psychologické a fyziologické procesy v jeho těle. Práce vznikla ve spolupráci se společností Robe Lighting s.r.o., která poskytuje podporu při tvorbě diplomové práce. Téma práce a návrh svítidla koresponduje s aktuálním stavem poznání v oblasti vlivu světla na člověka. Navržené svítidlo v trendu HCL vyniká především kvalitou vyzařovaného světla, které však přichází do střetu s finanční stránkou návrhu.

KEYWORDS

Svítidlo, optický návrh, LightTools, Dialux EVO, osvětlení se zaměřením na člověka, cirkadiánní systém.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Návrh interiérového svítidla v trendu Human Centric Lighting“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

Poděkování

Děkuji všem, kteří se přímo i nepřímo podíleli na tom, že jsem mohl tuto práci dokončit, především Ing. Martinovi Antošovi, Ph.D. za odborné vedení. Dále děkuji Ing. Janu Vilémovi, Ing. Janu Zámečnickovi, Ing. Tomášovi Davidovi za cenné rady při zpracování praktické části práce. Poděkování patří i Ing. Jaroslavu Štěpánkovi za rady a připomínky v oblasti světelné techniky. Dále také děkuji pracovníkům Ústavu elektroenergetiky na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně za poskytnutí měření ve světelné laboratoři.

Bc. Filip Ruml

OBSAH

Úvod	1
1 Teoretický přehled současných poznatků k HCL	3
1.1 Lidské oko	3
1.2 Nevizuální systém vnímání světla	4
1.3 Význam cirkadiánních rytmů u člověka	6
1.3.1 Cirkadiánní systém	7
1.3.2 Melatonin	7
1.3.3 Serotonin	9
1.3.4 Kortizol	9
1.4 Citlivost cirkadiánního systému	9
1.5 Možné způsoby měření vlivu světla na člověka	18
1.6 Kritéria hodnotící kvalitu návrhu osvětlení	19
1.6.1 Teplota chromatičnosti	19
1.6.2 Odchylka D_{uv} a Δ_{uv}	21
1.6.3 Hodnocení vjemu barvy	23
1.6.4 Index oslnění UGR (Unified glare rating)	29
1.6.5 Činitel cirkadiánní účinnosti	31
1.6.6 Metoda α -osvětlení	31
1.7 Interiérové svítidlo v trendu HCL	31
1.8 Normalizované druhy světla	35
1.9 Tepelný management LED	36
2 Návrh svítidla s ohledem na HCL a finální instalaci svítidel	39
2.1 Definice požadavků na návrh a jeho cíle	39
2.2 Světelný zdroj	39
2.2.1 Výběr LED světelné diody	40
2.2.2 Výpočet světelného toku zdroje svítidla	44
2.2.3 Řízení spektrálního složení světelného zdroje	46
2.3 Optický návrh svítidla	50
2.3.1 Koncept	50
2.3.2 DPS	52
2.3.3 Homogenizér	55
2.3.4 Část svítidla tvořící nepřímé světlo	68
2.3.5 Část svítidla tvořící přímé světlo	74
2.3.6 Finální návrh	77
3 Návrh využití svítidla v interiéru	83
3.1 Normativní požadavky na osvětlení v mateřských školách	83
3.2 Simulace osvětlení v softwaru Dialux Evo	84
4 Porovnání návrhu osvětlení s konvenčním návrhem z hlediska energetické náročnosti a kvality osvětlení	91
Závěr	93

Seznam použitých zdrojů	95
Seznam příloh	103

ÚVOD

Vědecký výzkum za poslední desetiletí významně změnil pohled na roli osvětlení a jeho vliv na člověka. Hlavním důvodem se stal objev nových buněk v lidském oku, které dokazují, že vytvořit aktuální vizuální vjem není jediným jeho účelem [1]. Tento zásadní objev v historii lidstva potvrdil, že světlo dopadající na sítnici oka ovlivňuje psychologické a fyziologické procesy v lidském těle každého jedince [2]. Společnost a vědecká sféra začala obracet svou pozornost na světelné prostředí vyskytující se kolem nás. Zásadní se stala skutečnost, že díky přesunutí aktivity lidí do budov, netvoří světelné prostředí příroda, ale sami současní lidé. Je proto důležité řešit do jaké míry odpovídá světelné prostředí, ve kterém žijeme našim vizuálním a biologickým potřebám. Pojem Human Centric Lighting (také HCL) obecně reprezentuje vše, co uvádí ve spojitosti světelné prostředí s lidským okem. Uplatnění nachází zejména v osvětlování prostorů s delším pobytem osob jako jsou kanceláře, vzdělávací zařízení nebo nemocniční lůžkové prostory. Další využití pak spatřuje v medicíně jako léčebná metoda. V neposlední řadě se uplatňuje při delším pobytu osob ve vesmíru, kde se nachází značně odlišné světelné prostřední.

Hlavním cílem diplomové práce navrhnout interiérové svítidlo v trendu Human Centric Lighting, které bude klást důraz zejména na kvalitu tvořeného světla a jeho vliv na lidský organismus. Parametry svítidla jako vzhled, finanční náročnost a spotřeba elektrické energie budou řazeny mezi druhořadé požadavky. Diplomová práce by kromě jiného měla sloužit i jako jakýsi průvodce návrhem osvětlení se zaměřením na člověka a jeho světelnou pohodu.

Obsah je členěn do 4 hlavních kapitol. První polovina kapitoly 1 uvádí současný stav poznání v oblasti vlivu světla na člověka. Druhá její část popisuje možný způsob, jakým lze hodnotit kvalitu návrhu osvětlení z hlediska HCL a okrajově se také dotýká tepelného managementu LED světelných diod. Stejně, 2. kapitola, obsahuje časově náročnější vývoj návrhu svítidla s ohledem na HCL. Ten sahá od volby a definice světelného zdroje, přes jeho řízení až k samotnému optickému návrhu celého svítidla. Náplň 3. kapitoly je ověření využití navrženého svítidla v interiéru pomocí simulace osvětlení prostoru mateřské školy v softwaru Dialux EVO. Kde v následující 4. kapitole je toto osvětlení se zaměřením na člověka srovnáno s konvenčním typem osvětlení.

Optický návrh je proveden v komerčním softwaru pro optický design LightTools, jehož licence spolu se znalostní podporou byla poskytnuta společností Robe Lighting s.r.o.

1 TEORETICKÝ PŘEHLED SOUČASNÝCH POZNATKŮ K HCL

Zrak, jako lidský smysl, nám poskytuje vizuální informaci o našem okolí. Během posledních dvou desetiletí byl potvrzen vliv světla pronikajícího do lidského oka na fyziologické a psychologické procesy v lidském těle. Studium chování lidí prokázalo vliv světelného prostředí na chování člověka, bdělost a jeho náladu [3,4]. Tento způsob vnímání světla nevytváří žádný vizuální obraz v mozku, ale pouze poskytuje informaci o přítomnosti nebo nepřítomnosti světla v našem prostředí [2]. Původní domněnka naznačovala, že tyto efekty jsou spojeny pouze s činností tyčinek a čípků. Několik pokusů provedených na člověku nebo na zvířatech trpícími ztrátou zraku ale prokázalo, že ani jeden z dosud známých fotoreceptorů není hlavním čidlem pro tyto procesy [5,6]. V roce 1998 byl v sítnici oka savců objeven a popsán další typ proteinů citlivých na světlo, melanopsin¹, vyskytující se odděleně od struktury známých fotoreceptorů [1,5,7]. Funkčně nezávislé fotoreceptory obsahující melanopsin jsou označovány jako vnitřně fotosenzitivní sítnicové gangliové buňky (intrinsically photosensitive Retinal Ganglion Cells; ipRGCs). Jejich umístění v sítnici lidského oka je na obrázku 1.1. Ve vrstvě gangliových buněk formují ipRGCs rozptýlenou fotosenzitivní síť, která pokrývá prakticky celou sítnici [2].

Zásadní objev umožnil nový pohled na umělé osvětlení, pod kterým trávíme stále větší a větší část našich životů. Nový, tvůrčí a nevšední úhel pohledu je velmi důležitý pro návrh svítidla a osvětlení všech prostorů, ve kterých se lidé často vyskytují. Při návrhu umělého osvětlení pro takové prostory je proto důležité nemyslet pouze na cenu, design, spotřebu elektrické energie, účinnost, ale také na kvalitu umělého světla, které ovlivňuje psychologické a fyziologické procesy v těle člověka. Celá tato kapitola má za úkol poskytnout všechny potřebné informace pro návrh svítidla s ohledem na procesy v těle člověka vyvolané světlem a jeho nevizuální (neobrazové, nezrakové) vnímání. První část kapitoly bude pojednávat obecně o vlivu světla na člověka a jeho světelnou pohodu. V druhé části se čtenář seznámí s veličinami a nástroji, které lze používat pro návrh osvětlení se zaměřením na HCL.

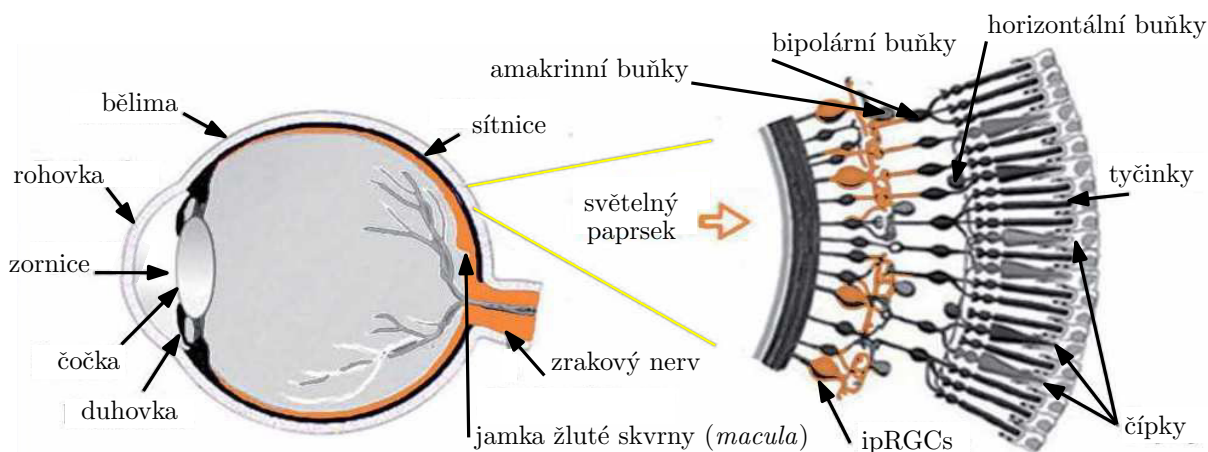
1.1 Lidské oko

Zrak je pro člověka nejdůležitějším smyslovým orgánem pro příjem informací. Téměř 80 % všech informací o našem okolí přichází očima [2,8]. Mozek využívá značnou část své kapacity ke zpracování podnětů proudících ze zrakového ústrojí. Lidské oko, hlavní a párový orgán zrakového ústrojí, bývá často označován za nejdokonalejší optický přístroj na Zemi [9]. Je schopné se přizpůsobit osvětleností cca od 0,25 lx až do 10⁵ lx [10]. Takto velkým změnám se oko přizpůsobuje změnou citlivosti zornice, fotoreceptorů oka a změnou velikosti vjemových polí sítnice. Vjemové pole je část plochy sítnice přibližně kurhového tvaru, z níž lze podráždit jedno vlákno zrakového nervu, tj. jednu gangliovou buňku. Pole se mohou překrývat a měnit v závislosti na jasu světelného podnětu a stavu adaptace sítnice [10]. Průměr zornice se může měnit od 1,8 mm do 7,5 mm. Změna průměru zornice trvá asi 360 ms, ale při náhlých změnách podnětu i 100 ms [11]. To vše dokazuje, že rozsah dynamiky vidění, vyvážení bílé barvy nebo ostření, v tomto všem je oko jedinečné a nedokáže dnešní techniku překonat.

Lidské oko má jednoduchý objektiv o dvou členech. Vnější členem je rohovka, vnitřním čočka, obrázek 1.1. Zbarvená duhovka funguje jako clona a redukuje množství světla, které vstupuje do oka. Světelné paprsky po průchodu okem dopadají na světločivné buňky (čípky, tyčinky a

¹Více v podkapitole 1.4

ipRGCs) nacházející se v jemné vrstvené bláně, tzv. sítnici. V těchto buňkách vlivem složitých biochemických reakcí dojde ke vzniku nervového vzruchu a ten je zrakovými nervy přenesen do zrakového centra v mozku nebo epifýzy. Vnímání světla lidským okem se dělí podle toho, do jakého místa v mozku nervový vzruch proudí, na vizuální a nevizuální systém vnímání světla, obrázek 1.2. Vizuálním systémem vnímání světla je myšleno vidění a vše s ním spojené. Nevizuální způsob vnímání světla pak zahrnuje všechny ostatní procesy, které působí světlo dopadající na sítnici v lidském těle.

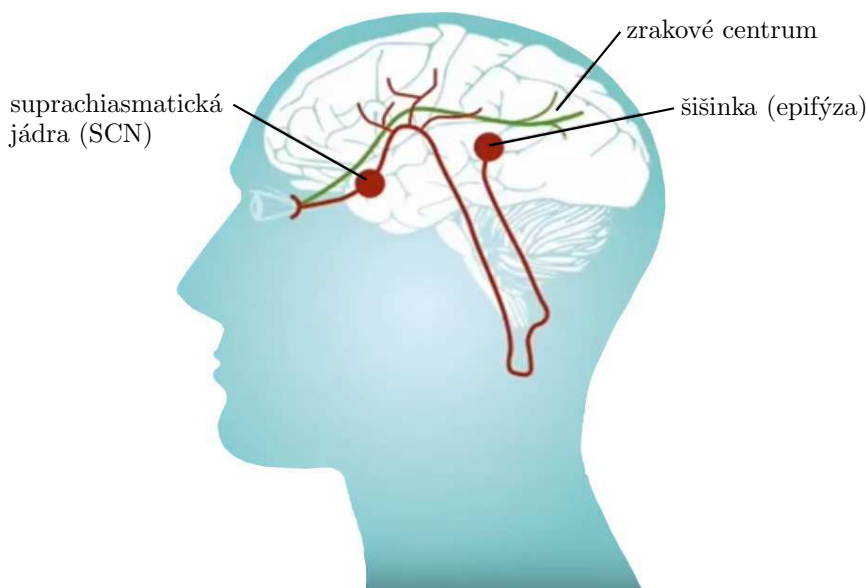


Obrázek 1.1: Lidské oko: Vlevo popis jednotlivých částí oka. Vpravo detail sítnice se zobrazením buněk a fotoreceptorů. Převzato z [2].

1.2 Nevizuální systém vnímání světla

Vnímání světla je pro člověka důležité pro orientaci v prostoru, příjem informací, komunikaci i vyjádření svých aktuálních pocitů. Hraje ale důležitou roli i v tvorbě hormonů a s nimi spojeným psychologickým a fyziologickým stavem lidského těla. Část světelné techniky, která se zabývá veškerým světlem dopadajícím na sítnici a jeho procesy vyvolané v těle člověka se nazývá Human Centric lighting. Nevizuální systém vnímání světla je jejím podoborem a zabývá se pouze těmi účinky světla, které nezajišťují vidění a zrakový vjem. Nevizuální systém vnímání světelného podnětu je anatomicky odlišný od vizuálního [12]. Světlo prochází okem přes rohovku, přední oční komoru, duhovku, následně zornici, čočkou, sklivcem až dopadne na sítnici, jak je znázorněno na obrázku 1.1. Sítnice, neurální část lidského oka, je vyživována cévnatkou a obsahuje světlocitlivé buňky. Tyčinky a čípky patří mezi světlocitlivé buňky, které jsou převážně využívány pro vizuální vnímání světla, tedy vidění. Tato práce věnuje velkou pozornost buňkám ipRGCs, které jsou majoritním senzorem nevizuálního systému. Tyto buňky tvoří malou část celkové populace gangliových buněk (1–5 % dle druhu a metody hodnocení [13]) a jsou rovnoměrně rozptýleny po celé sítnici. Celý systém oka reaguje na globální změny. V sítnici se nachází nejméně pět typů buněk ipRGCs, které se liší morfologií, propojením s tyčinkami a čípkami, obsahem hormonu melanopsinu a vnitřní fotosenzitivitou [13, 14]. Informaci o přijatém světle však buňky ipRGCs neposílají do týlního laloku mozku (zrakového centra), jak je tomu u čípků a tyčinek. Z buněk ipRGCs cestuje nervový vzruch nesoucí informaci o přijatém světle optickým nervem do malých shluků mozkových buněk

tzv. suprachiasmatických jader². Suprachiasmatická jádra (také SCN) se nachází přímo v místech křížení optických nervů vedoucích z oka člověka do mozku a označují se jako sídlo biologických hodin [6, 12, 15, 16]. Jádra se skládají z několika tisíců buněk, z nichž každá může vysílat signál v podobě elektrické energie [17]. Nejdůležitější signály pro biologické hodiny však SCN vysílají do šišinky mozkové, tzv. epifýzy. Epifýza se stará o tvorbu důležitých hormonů (melatonin, serotonin a kortizol³), které mají vliv na naše chování a celkový psychický stav [8, 9, 16]. Mnoho experimentů dokazuje, že aktivita šišinky je řízena prvotně světlem upravujícím hodnoty hladiny hormonů v těle [5–9, 12, 13, 18]. Avšak hlavními biologickými hodinami jsou stále suprachiasmatická jádra, po jejichž odstranění se savec stává aritmickým [15].



Obrázek 1.2: Vizuální a nevizuální systém vnímání světla u člověka. Zelenou barvou je vyobrazena cesta signálu vytvořeného světelným podnětem končícím v týlním laloku, neboli zrakovém centru mozku (vizuální systém). Červenou barvou je na obrázku znázorněn signál zodpovídající za nevizuální vnímání světla a procesy s ním spojené. Převzato a upraveno z [19].

Biologické hodiny, nebo též cirkadiánní hodiny, vyjadřují u mladého člověka cca 24 hodinový cyklus [7] svázaný s otočením planety Země kolem své osy, tikají v lidském organismu celý život a řídí naše denní aktivity. Centrální biologické hodiny řídí všechny pravidelně se opakující děje v našem těle [15]. Kromě nich existují v těle další periferní hodiny, které řídí činnost plic, srdce, ledvin, jater i ostatních orgánů, ovlivňují soustředění a vnímání, stejně jako fyzickou a duševní kondici. Tato práce se zabývá cirkadiánními hodinami a jejich rytmicitou, neboli cirkadiánními rytmy⁴. Studium těchto rytmických tělesných procesů se zabývá věda zvaná chronobiologie. Z českých chronobiologů je nejznámější profesorka Helena Illnerová, která se svým týmem na modelu potkana zkoumala, jak změna osvětlení během střídání ročních období ovlivňuje cirkadiánní rytmus a tvorbu melatoninu v epifýze [16]. U zdravého mladého člověka je jedna perioda cirkadiánního rytmu bez působení vnějších vlivů 24 hodin, den zabírá 16 hodin z cyklu a zbylých 8 hod noční doba. Mezi jednotlivci se však může tato perioda individuálně lišit a to v rozsahu od

²Z latinského „chiasma opticum“ neboli křížení zrakových nervů.

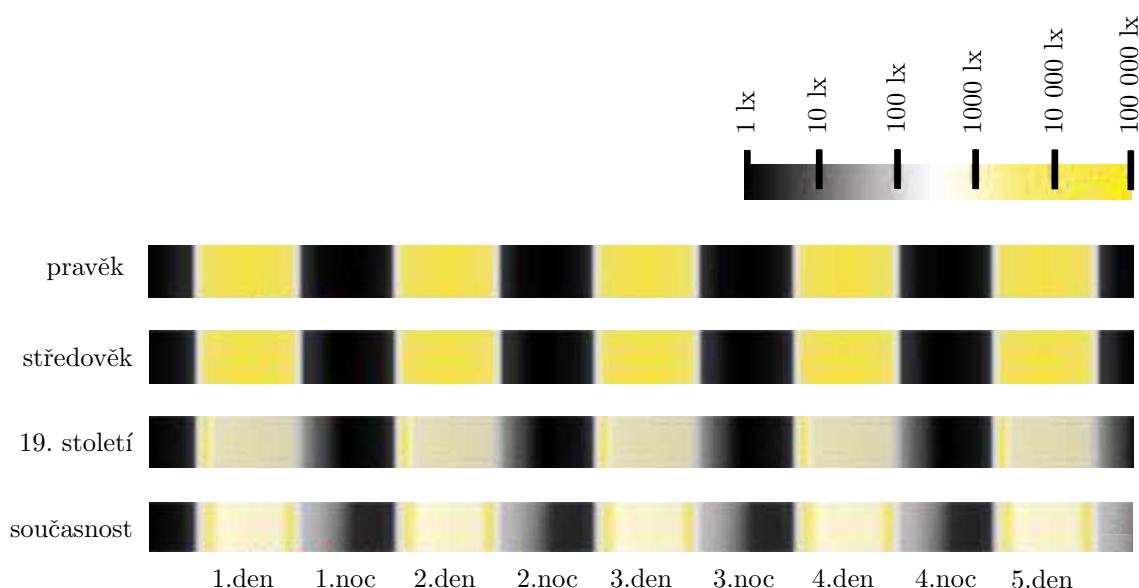
³Hormony melatonin, serotonin a kortizol jsou popsány v částech 1.3.1 až 1.3.3.

⁴Výraz vznikl z latinského *circa* jinak také „přibližně“ a „*dies* znamená „den“.

23,6 do 25,1 hodin [2, 8, 14]. Její délka je dána geneticky a každý jedinec má svou vlastní periodu se svou délkou cyklu.

1.3 Význam cirkadiánních rytmů u člověka

Dostupnost světla ovlivňuje vývoj člověka už od jeho počátků. V období pravěku a středověku byl hlavním činitelem, který určoval životní styl, rytmus střídání dne a noci a pravidelný cyklus střídání ročních období. Pracovat bylo možné pouze ve dne, kdy bylo světlo a odpočinku se dostávalo vždy přes noc. Slunce bylo jediným světelným činitelem, který ovlivňoval cirkadiánní rytmus člověka. Postupem času se však s vývojem průmyslu začaly objevovat další zdroje světla. Od svíčky, přes olejové a plynové lampy až k dnešnímu elektrickému osvětlení. Tento vývoj umožnil člověku aktivitu nejen ve dne, ale i během noci. Naše světelné prostředí, a tedy i způsob života, se výrazně změnilo. Avšak fyziologicky se současný člověk od svého jeskynního předchůdce téměř neliší, naše vnímání světla se v podstatě nezměnilo. Zajištění biologických funkcí řízených světlem je optimalizováno pro světelné prostředí, v jakém žili naši předkové v době kamenné. Současný životní styl a naše aktivity jsou však velmi rozdílné od původních činností, pro které se naše zrakové ústrojí po tisíce let vyvíjelo. Dnešní člověk je tedy během dne vystavován malému množství světla mnohdy kvalitou velmi vzdálenou od denního světla. A za noci, která by měla být bez dopadu světla na sítnici, je díky dnešním smartphonům, televizorům a pouličnímu osvětlení lidské oko osvětlováno. Na obrázku 1.3 je zobrazen průběh pěti dnů v jednotlivých etapách vývoje lidstva v závislosti na množství světla, které během dne a noci na člověka působí. Tento konflikt mezi dnešními skutečnými světelnými podmínkami v budovách a požadavky našeho těla může značně ovlivňovat cirkadiánní rytmy v lidském těle a s nimi spojený zdravotní a psychický stav.



Obrázek 1.3: Světelné prostředí v jednotlivých historických obdobích lidstva. Průběh intenzity osvětlení, které se člověk vystavoval během 5 běžných dnů. Převzato a upraveno z [20].

1.3.1 Cirkadiánní systém

Cirkadiánní systém se chová jako jakýsi oscilátor řízený tzv. synchronizátory [2]. Synchronizátory jsou podněty z vnějšího prostředí, které ovlivňují cirkadiánní procesy. Nejúčinnějším a primárním synchronizátorem je denní světlo. Cyklické střídání světla a tmy během dne, stejně jako sezonní změny ovlivňují chování každého jednotlivce. Velmi intenzivní světlo během dne pomáhá udržet organismus v bdělém stavu, aktivní, soustředěný a připravený na každodenní činnosti. Naopak nepřítomnost světla v noci umožňuje lidskému organismu potřebný odpočinek a obnovení sil během nočního spánku. Mezi synchronizátory patří i příjem potravy, svalová aktivita, návyky nebo sociální kontakt [20]. Pokud je dlouhodobě narušován některý z externích synchronizátorů, může dojít k rozdílu jejich fází a následně k rozfázování cirkadiánní rytmicity. Vzniká tak i riziko, že amplitudy a fáze jednotlivých rytmických procesů v těle se mohou začít vzájemně mýjet a celý organismus může být desynchronizován [2], viz obrázek 1.4.



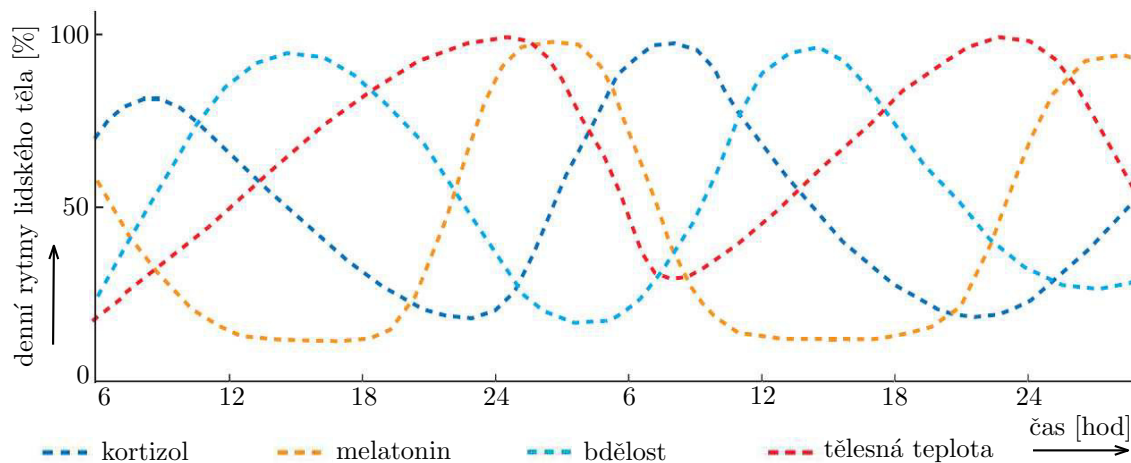
Obrázek 1.4: Schéma synchronizace cirkadiánních rytmů. Jednotlivé typy černých čar (tečkovaná, čárkovaná, plná) reprezentují odlišné synchronizátory. Ty přímo ovlivňují cirkadiánní rytmus lidského těla vyznačený na obrázku červenou barvou: a) Stejná fáze synchronizátorů tvoří silný rytmus. b) Posunuté fáze vytvoří nevýrazný a slabý cirkadiánní systém s nízkou amplitudou.

Vystavení lidského oka světlu k večeru a v první polovině subjektivní noci vede obecně ke zpoždění fáze cirkadiánních rytmů. Světlo v druhé polovině noci naopak zapříčiní předběhnutí fáze [7, 8, 21]. Organismus se snaží vyrovnat se zpožděním celého cyklu, než jeho předběhnutím. Důkazem toho je pásmová nemoc (jet lag). Důsledkem rychlého přesunu přes několik časových pásem bývá často nevolnost, bolesti hlavy a únava celého těla. Jak již bylo v předchozí podkapitole zmíněno, v závislosti na světle dopadajícím na sítnici se v endokrinní žláze, tzv. epifyze (šišince) tvoří hormony melatonin, serotonin a kortizol. Šišinka se snaží synchronizovat cirkadiánní rytmy prostřednictvím těchto tří hormonů. Dvoudenní průběh hladiny melatoninu a kortizolu u zdravého člověka je spolu s tělesnou teplotou a bdělostí vyznačen na obrázek 1.5.

1.3.2 Melatonin

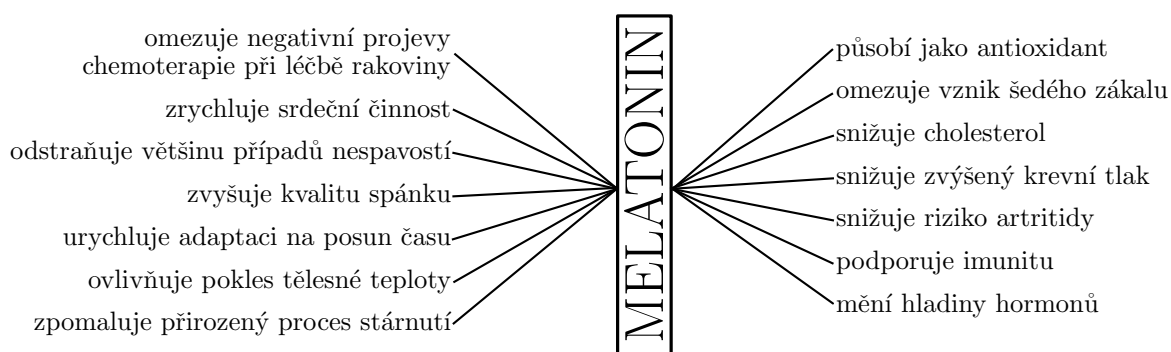
Hlavní funkcí melatoninu, někdy také nazývaného hormonem spánku, je regulace cirkadiánního cyklu. U všech živých organismů, ať už aktivních ve dne nebo během noci, se melatonin tvoří výhradně v noci. Vždy na večer nastupuje únava a v epifyze se začne tvořit hormon melatonin vykazující cirkadiánní produkci, viz obrázek 1.5. Melatonin se začne dostávat do krve, roztáhnou se cévy v končetinách, teplo uniká do okolí a klesá tělesná teplota. Tělo se tak chystá ke spánku a odpočinku. Kvalita spánku během noci závisí na hladině melatoninu v krvi. Jak nastupuje den, tvorba melatoninu poklesne nebo se úplně zastaví a začne vzrůstat tělesná teplota. Melatonin se v této chvíli začne v epifyze přeměňovat na serotonin. Hladiny hormonů aktivity a stresu, serotonin a kortizol,

vzrůstají a udržují tělo aktivní po celý den. Na jeho konci začne hormon melatonin opět vykazovat cirkadiánní produkci a celý cyklus se takto stále opakuje, samozřejmě v závislosti na světle dopadajícím na sítnici [6, 12, 13, 18, 22, 23].



Obrázek 1.5: Průběh hladiny hormonů kortizolu a melatoninu v lidském těle během dvou běžných dnů (48 hodin). Znázorněna i změna teploty lidského těla a jeho celková bdělost. Převzato a upraveno z [16].

Produkce melatoninu je nejvyšší u kojenců, od 15-tého roku následuje rychlý pokles a ve věku okolo 50 let je pouhou šestinou původní hodnoty [15]. S přibývajícím věkem množství hormonu dále klesá, což mnohdy vysvětluje nespavost a depresi starých lidí. Produkci melatoninu také snižují nesteroidní protizánětlivé léky, ibuprofen, nadbytečné množství kofeinu nebo vitamínu B12, některé léky proti úzkosti, kortikosteroidy, nebo užití alkoholu a tabáku před spaním [15]. Zvýšit hodnoty melatoninu v těle lze velmi jednoduše, a to dostatkem přirozeného slunečního světla přes den a úplné tmy v noci. Obrázek 1.6 zdůrazňuje význam melatoninu v těle a popisuje jeho pozitivní účinky na lidský organismus [15].



Obrázek 1.6: Pozitivní účinky hormonu melatoninu. Podle [15].

1.3.3 Serotonin

Serotonin, označovaný jako hormon dobré nálady, vzniká z aminokyseliny zvané tryptofan. Je zodpovědný za optimistické myšlení, pocit nasycení a pomáhá organismu vytvářet a udržovat pozitivní emoce a náladu. Hraje důležitou roli v pocitovém stavu člověka během každého dne. Při nízké hladině serotoninu nastoupí stres, deprese, úzkost a mohou nastat problémy s pamětí. Nerovnováha tohoto hormonu může být i příčinou různých trávících problémů. Serotonin je důležitým prvkem ovlivňujícím srážlivost krve a jeho nedostatečné vylučování může být příčinou vzniku migrén. Jelikož je serotonin závislý na množství světla dopadajícího na sítnici, jeho nedostatek se může projevit hlavně v zimních měsících, když člověk nemá dostatečný přísun slunečního světla. To může zapříčinit úzkostné a depresivní stavy během těchto měsíců.

1.3.4 Kortizol

Kortizol je jedním z hlavních hormonů stresové reakce v lidském těle, jeho základní hladina je regulována cirkadiánním systémem [15]. Dává organismu podnět k probuzení a aktivitě. Po probuzení je hladina kortizolu zvýšená, do normálního stavu se dostává během dvou hodin a výrazně klesá opět před spánkem [24]. Nejnižší koncentrace dosahuje hormon kolem půlnoci. Nízká hladina kortizolu může vést k obezitě, depresi, poruše příjmu potravy, oslabení imunity, neplodnosti, poškození paměti, posttraumatické stresové poruše a dalším nepříznivým procesům pro lidský organismus [24,25]. Správnou hladinu tohoto hormonu v těle lze, kromě vystavení oka světlu, dosáhnout také přísunem vitamínu C, černého čaje, ženšenu, hořčičku a vyhýbáním se stresovým situacím [25]. Kortizol zvyšuje obsah cukru v krvi, aby tělo získalo energii a posílil se imunitní systém [24,25].

1.4 Citlivost cirkadiánního systému

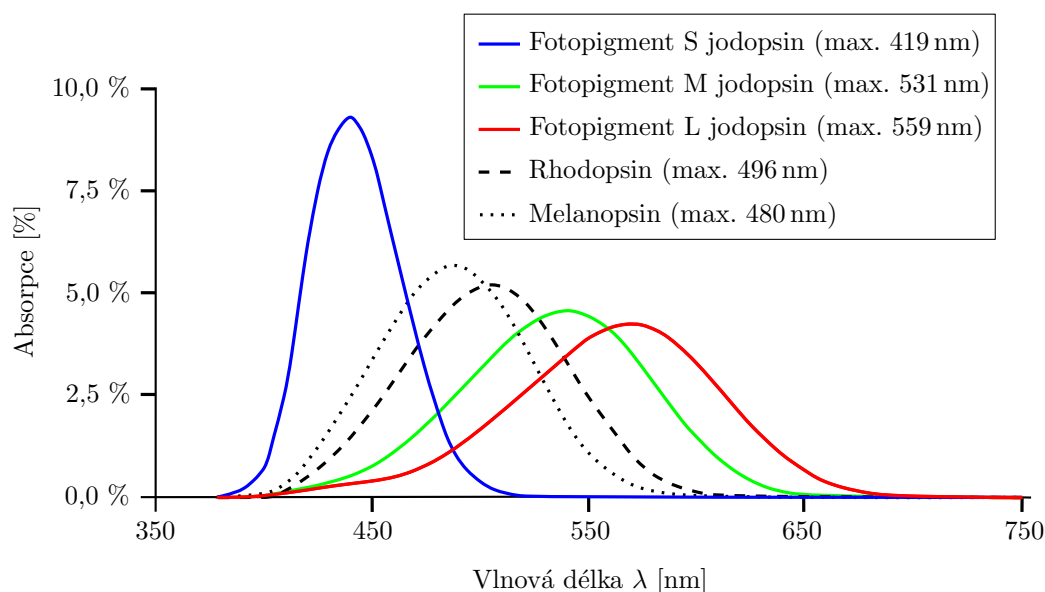
Objev ipRGCs zapříčinil, že světelný průmysl a akademická sféra se začala zabývat vlivem světla na člověka a jeho nevizuální účinky [1]. Snahou je naleznout způsob, jak kvantifikovat míru vlivu světla na lidský organismus, psychologii člověka a jeho chování. Existují dvě obecně rozšířené kategorie techniky měření světla: radiometrie a fotometrie. Radiometrie je založena na popisu fyzikálních vlastností světla, nejčastěji jeho vlnové délky a energie. Radiometrický měřicí přístroj zaznamenává zářivou energii na definovaném rozsahu vlnové délky elektromagnetické energie. Fotometrie je speciální obor radiometrie, který bere v úvahu fakt, že biologické fotoreceptory v lidském oku nejsou stejně citlivé na všechny vlnové délky světla. Fotometr je radiometrický přístroj, který používá filtry k určení odezvy detektoru přístroje na odlišné vlnové délky v závislosti na spektrální citlivosti lidského zraku. Většina dostupných fotometrických přístrojů k tomu používá křivku $V(\lambda)$ nazývanou spektrální citlivost lidského oka CIE normalizovaného pozorovatele⁵. Ta vyjadřuje citlivost čípků na střední a vyšší vlnové délky viditelného spektrálního složení světla s maximem cca při 555 nm [5]. Cirkadiánní systém a gangliové buňky mají však odlišnou spektrální, prostorovou, časovou a absolutní citlivost od fotopického vidění a vizuálního systému vnímání světla [7]. Tato podkapitola seznámí čtenáře s citlivostí cirkadiánního systému (ipRGCs) a s problémy, které se v této oblasti vyskytují.

Sítnice lidského oka obsahuje pět fotopigmentů, které jsou zodpovědné za příjem světla. Tři z nich jsou obsaženy v čípcích a zodpovídají za denní, barevné vidění. Nazývají se jodopsiny S,M,L⁶. V noci se uplatňuje čtvrtý fotopigment rhodopsin, který se nachází v tyčinkách. Ten absorbuje

⁵Průměrný lidský pozorovatel, neboli normalizovaný pozorovatel byl definován na setkání mezinárodní komise pro osvětlování CIE v roce 1931.

⁶V anglické literatuře lze skupinu jodopsinů S,M,L dohledat pod názvy cyanopsin, chloropsin, erythroopsin.

energií celého viditelného spektrálního složení zdroje, neslouží však k rozlišení barev, ale uplatňuje se při skotopickém vidění. Maximum citlivosti má na vlnové délce 507 nm [8]. Posledním fotoreceptorem je nedávno objevený melanopsin, primární pigment pro cirkadiální rytmy obsažený v buňkách ipRGCs. Melanopsin je fotopigment patřící do velké skupiny světlocitlivých sítnicových proteinů zvaných opsiny (rhodopsin, jodopsin a melanopsin), které se vyskytují v sítnici každého savce na Zemi [26]. Jejich spektrální citlivost pro lidské oko je vyobrazena na obrázku 1.7. Fotopigment melanopsin je o několik řádů méně citlivý než ostatní opsiny, tudíž k aktivaci potřebuje mnohem více světla, než tyčinky a čípky [17]. Pravděpodobnost dopadu fotonu na ipRGCs je pro danou plochu fotostimulace sítnice více jak milionkrát menší než u tyčinek a čípků [13]. Buňky ipRGCs tvoří sice malou část celé polace gangliových buněk, ale stále jsou hlavním fotoreceptorem pro přenos informace o přijatém světle do SCN [13]. Dle [9] tvoří ipRGCs přibližně 1–3 % populace gangliových buněk.



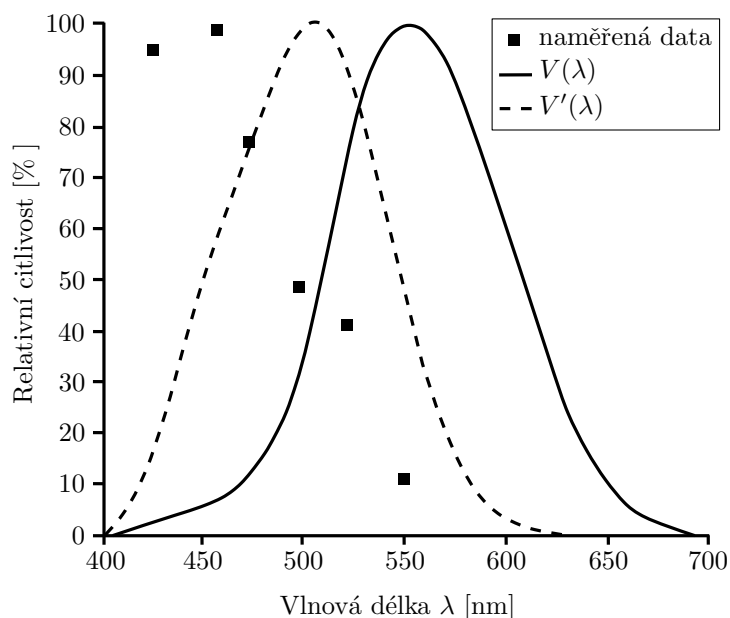
Obrázek 1.7: Absorpční spektrum fotoreceptorů sítnice lidského oka. Všechny spektrální křivky jsou normalizovány a mají stejnou integrační plochu. Převzato a upraveno z [27].

Roku 2000 Zeitzer et al. [28] publikoval autor studii působení bílého polychromatického světla na člověka a jeho hladinu melatoninu v krvi při pobytu pod osvětlením interiéru průmyslových budov. Důležitým poznatkem studie bylo zjištění, že pobyt v místnostech s osvětleností 200 lx může měnit množství melatoninu v lidském těle. Při vystavení větším intenzitám (např. 500 lx) po dobu 6,5 h může dokonce posunout cirkadiální rytmus člověka. Hodnoty osvětlenosti v běžném interiéru budov dokáží znatelně potlačit hodnoty melatoninu v krvi. Tento závěr byl později potvrzen několika dalšími výzkumy [5–9, 13, 14]. Následně vznikly první pokusy modelovat spektrální citlivost cirkadiálního systému, které byly založeny na potlačení akutní hladiny melatoninu v lidském těle během noci. Vystavením sítnice lidského oka světlu v noci a sledování hladiny melatoninu se začali zabývat Kavita Thapan *et al.* a George C. Brainard *et al.* Své výsledky publikovali roku 2001 v [12] a [18].

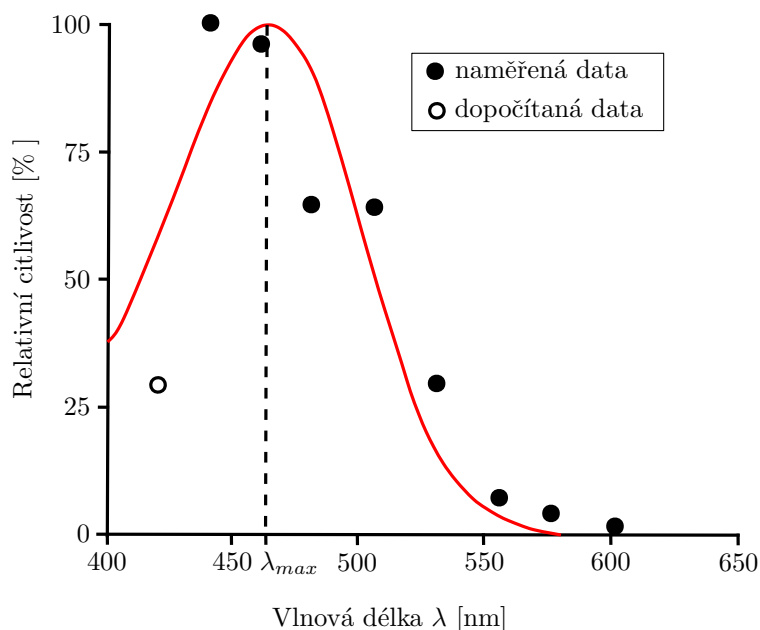
Thapan [12] prováděl výzkum s 22 dobrovolníky (18 mužů, 4 ženy) ve věku od 18 do 45 let, kterým osvětloval sítnici 30 minutovými pulzy monochromatickým světlem vlnových délek 424, 456, 472, 496, 520, 548 nm v době mezi 23:30 a 02:30. Zkoumané subjekty byly zdravé, drogově

nezávislé, bez očních vad a dodržovaly pravidelné cykly spánku. Sítnice byla osvětlována světlem různé intenzity s rovnoměrným rozložením. Průměr zornice každého subjektu dosáhl při osvětlování téměř desetkrát větší hodnoty od jejího běžného stavu. Naměřená data musela být proto ponížena pomocí koeficientu, který korigoval tuto odchylku. Stejně tak musela být upravena data Brainarda. Výsledky experimentu naznačují existenci nového opsinu s maximem citlivosti kolem 459 nm (457–462 nm, $r^2 \geq 0,73$), viz graf na obrázku 1.8. Nevylučuje se také možnost, že k potlačení hladiny melatoninu přispívají i jiné fotopigmenty. K tomuto má nejbliže fotopigment jodopsin S [12].

Brainardova studie [18] zkoumala potlačení hladiny melatoninu v krvi při osvětlování lidského oka v noční době monochromatickým světlem vlnových délek 440, 460, 480, 505, 530, 555, 575 a 600 nm. Subjektem výzkumu se stalo 72 dobrovolníků (37 žen a 35 mužů) ve věku 18ti až 30ti let různých rasových příslušností. Sítnice oka byla osvětlována xenonovou výbojkou o příkonu 450 W až 1200 W sedmi různými intenzitami po dobu 90 min se začátkem vždy v 02:00. Výsledná data jsou znázorněna na obrázku 1.9. Body ve tvaru plných kruhů reprezentují naměřená data normalizovaná na maximum citlivosti a jsou zakreslena jako log relativní citlivosti. Bod při nižších vlnových délkách ve tvaru nevyplněné kružnice je odhadnutá konstanta citlivosti pro vlnovou délku 420 nm, která byla dopočítána z naměřených dat. Červenou barvou je znázorněna pomocí logistické funkce dopočítaná křivka s maximem citlivosti při 464 nm a vysokým korelačním koeficientem $r^2 \geq 0,91$. Brainardovy data opět podporují tvrzení, že za regulaci hormonu melatoninu v lidském těle pomocí světla není zodpovědný žádný do té doby známý fotopigment v lidském oku. V [18] přisuzuje křivku citlivosti novému opsinu založenému na retinaldehydu vitamínu A, který s největší pravděpodobností poskytuje cirkadiánní vstup pro regulaci melatoninu v těle s maximem citlivosti mezi 446 a 477 nm. Stejně jako Thapan nevylučuje možné přispívání jiných fotopigmentů k regulaci cirkadiánních rytmů [18].

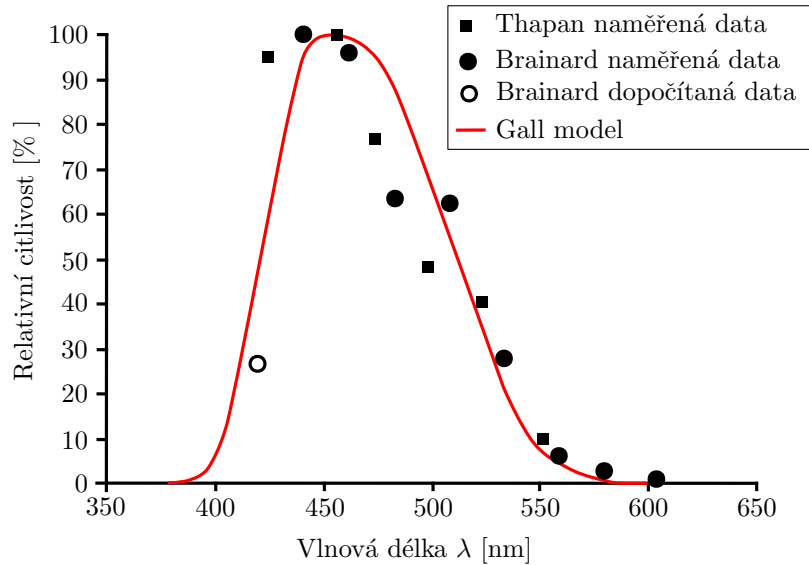


Obrázek 1.8: Thapan *et al.*: Závislost relativní citlivosti lidského oka na vlnové délce při osvětlování sítnice monochromatickým světlem. Maximum při 459 nm. Pro srovnání vyobrazena křivka poměrné spektrální citlivosti fotopického $V(\lambda)$ a skotopického $V'(\lambda)$ vidění pro normalizovaného pozorovatele CIE. Převzato a upraveno z [12].



Obrázek 1.9: Brainard *et al.*: Závislost relativní citlivosti lidského oka na vlnové délce. Maximum při 464 nm. Logistickou funkcí určená křivka (červená barva) z naměřených dat s vysokým korelačním koeficientem $r^2 = 0,91$. Převzato a upraveno z [18].

Přestože se metody obou těchto vědců mírně lišily, oba se shodli, že tyčinky ani čípky nemohou být primárním fotoreceptorem pro cirkadiánní systém. Citlivost potlačení melatoninu během noci má maximum v mnohem nižších vlnových délkách než 500 nm. Jejich výzkumy identifikovaly rozsah vlnových délek od 446 do 477 nm jako nejvíce účinný pro potlačení melatoninu v lidském těle. Při porovnání obou výzkumů se výsledná data neshodují v oblasti jak vyšších vlnových délek (470–530 nm), tak při hodnotě okolo 420 nm (viz obr. 1.11). Citlivostí opsinu na světlo vlnové délky 420 nm se opět zabýval později Brainard v [6], kde potvrdil korektnost svého modelu. Jeho data demonstrují přibližně dvakrát větší citlivost na vlnové délce 460 nm oproti 420 nm. Pozdější druhý model křivky (publikace [6] vydaná r. 2008) vykazuje i mírně nižší citlivost jednoduchého opsinu na světlo vlnové délky 420 nm ve srovnání s prvním modelem. Na obrázku 1.12 je bod vyjadřující citlivost na světlo o vlnové délce 420 nm vyznačen zelenou barvou. Publikace Thapana a Brainarda jsou velmi důležité a rozpoutaly řadu otázek. V následujících letech byl objeven pátý opsin založený na vitamínu A nazývaný melanopsin [1]. Také byla přesněji určena jeho spektrální citlivost na viditelnou část světla s maximem na vlnové délce 480 nm [7, 9]. Tím vyvstaly další pochybnosti o prvních pokusech modelovat citlivost cirkadiánního systému, protože Brainard uvedl maximum při 464 nm a Thapan při 459 nm [18]. Dále nebylo při experimentu přesně určeno a změřeno spektrum světla dopadajícího na sítnici. Navzdory těmto pochybnostem se staly modely spektrální citlivosti cirkadiánního systému lidského těla vytvořené Brainardem a Thapanem důležitým a uznaným základem pro další výzkumy. [4–8, 13]. Nejpozději do tří let od publikování Brainarda a Thapana, vytvořil na základě těchto dvou souborů dat Dietrich Gall *et al.* jednoduchý, náhodilý, lineární a matematicky určený model pro citlivost melanopsinu [7, 29], viz obrázek 1.10. Gallův model a jeho křivka citlivosti pro stanovení vlivu světla na cirkadiánní rytmy je jedním z prvních v praxi použitelných modelů. Ignoruje ale neshody výsledků obou experimentů v nižších i vyšších vlnových délkách.

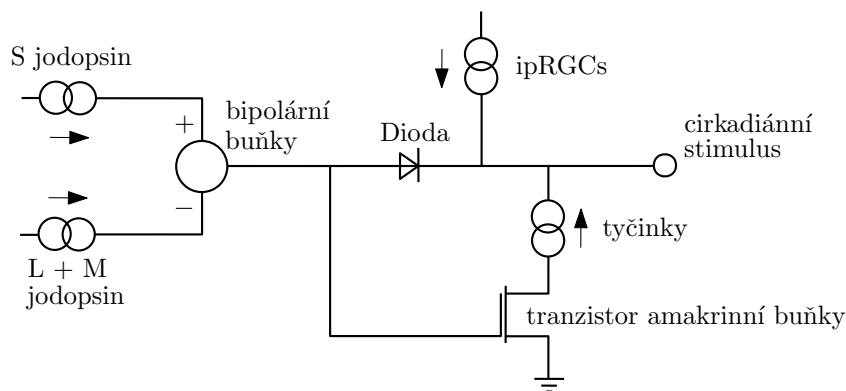


Obrázek 1.10: Dietrich Gall *et al.*: Matematicky určený model citlivosti cirkadiálního systému člověka na základě naměřených dat Brainarda a Thapana. Převzato a upraveno z [29].

Navzdory mnoha důkazům, které označují melanopsin obsažený v ipRGCs jako primární čidlo pro cirkadiální rytmus, hrají tyčinky a čípky stále roli v řízení cirkadiálního systému. Při odstranění melanopsinu a tyčinek z oka laboratorní myši kompenzují ztrátu zbylých fotopigmentů, částečně řídí cirkadiální rytmus zvířete a posílají informaci o přijatém světle do SCN [6]. Pokud jsou odstraněny veškeré fotopigmenty z oka, ztrácí zvíře vizuální i nevizuální funkce vnímání světla [6]. Oko hlodavce můžeme v omezeném měřítku srovnávat s lidským okem. Přináší to však několik zásadních výhod. Množství světla, které je nutné pro cirkadiální aktivaci, se pohybuje u hlodavců v hodnotách desetkrát až stokrát menších než u člověka. Stejně tak je to s celkovou dobou osvětlování sítnice oka. Tyto studie prováděné na hlodavcích demonstrují propojení tyčinek a čípků s ipRGCs i přestože nemohou být přímo propojeny. Komunikace mezi fotopigmenty by mohla probíhat prostřednictvím bipolárních, horizontálních nebo amakrinních buněk (viz obr. 1.1) [7]. Už během roku 2002 dle [6] se v dlouhé řadě studií začalo polemizovat o možnosti, že fotopigment jodopsin S může hrát také významnou roli v řízení biologických hodin člověka. Tyto a mnoho dalších důkazů potvrzují, že model jednoduchého opsinu není zcela dostačující pro úplný popis citlivosti cirkadiálního systému. Bylo tedy potřeba vytvořit aktuálnější model.

Významný posun v tomto oboru provedl profesor Mark S. Rea, který modeloval křivku citlivosti (viz obr. 1.12) i s ohledem na možné přispívání tyčinek a čípků k cirkadiálnímu řízení. Potvrdil propojení tyčinek a čípků s ipRGCs přes bipolární a amakrinní buňky. Všechny fotopigmenty lidského oka se tedy účastní řízení cirkadiálního systému. Z čípků má největší zastoupení právě jodopsin S. Je nejvíce podobný ipRGCs v hustotě rozložení buněk po sítnici. Oproti M, L jodopsinu zabírá pouze 5–10 % populace všech čípků a nenachází se v centrální jamce lidského oka. Stejně tak jamka neobsahuje světlocitlivé buňky tyčinky. Je to čistě fotopická oblast sítnice nacházející se na optické ose oka, která obsahuje pouze M, L jodopsin. Tyčinky nejsou napojeny přímou cestou na ipRGCs, mohou však komunikovat přes amakrinní buňky, které poskytují propojení mezi skotopickou (tyčinky) a fotopickou (S jodopsin) částí. V sítnici oka se vyskytuje přibližně 29 různých druhů amakrinních buněk, což je více než u jiného neuronu nacházejícího se v oku člověka. Přestože přesná role každého z druhů amakrinní buňky je neznámá, v modelu (citlivosti

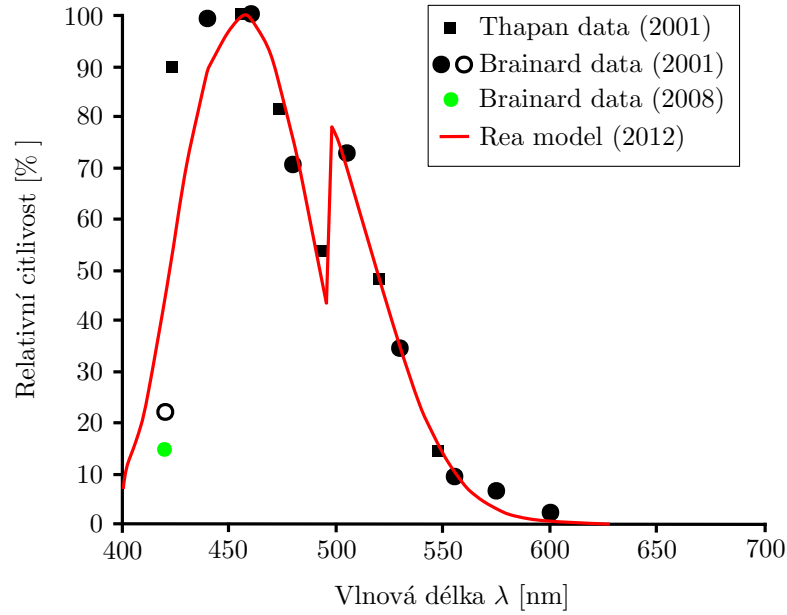
cir. systému) na obrázku 1.12 se předpokládá, že spojení ipRGCs s jodopsinem S přes amakrinní buňky existuje [5, 7, 9]. Svůj nelineární model publikoval Mark S. Rea roku 2005 v [9] pro monochromatický i polychromatický světelný zdroj. Byl vytvořen sloučením široké škály dostupné literatury a sestrojen na základě do té doby objevených fotopigmentů a dostupných informací o neuroanatomii a fyziologii sítnice lidského oka. Model pracuje s křivkami citlivosti z obrázku 1.8 a 1.9 jako s platnými, protože nebyly dostupné jiné experimenty zabývající se citlivostí cirkadiálního systému na monochromatické světlo. Kromě těchto dvou výzkumů je model založen i na dalších publikovaných experimentech zabývající se citlivostí cirkadiálního systému [30, 31]. Autor Mark S. Rea zahrnul i několik vlastních měření. Schéma použitého způsobu propojení všech fotopigmentů oka je znázorněno na obrázku 1.11. Na základě tohoto schématu komunikace buněk oka je dle vzorců 1.2 a 1.4 sestrojena nelineární křivka citlivosti cirkadiálního systému na obrázku 1.12. Dioda značí propustnost signálu pouze v jednom směru a ve výpočtu reprezentuje koeficienty k , a_{b-y} , a_{rod} , které jsou zde za účelem možné úpravy modelu podle budoucího vývoje a posunu ve zkoumání cirkadiálního systému. Funkce tyčinek zahrnuje nastavení mezní hranice kombinace množství světla a spektrálního složení zdroje, která už může způsobit cirkadiální aktivitu. Celá tato komunikace se nejspíše děje prostřednictvím amakrinních buněk. Čípky komunikují s ipRGCs skrz bipolární buňky. Ovlivňují ale také zapojení tyčinek do procesu řízení cirkadiální aktivity. Vysláním signálu mohou přerušit jednosměrnou větev propojení tyčinek s ipRGC přímo na tranzistoru amakrinní buňky a znemožnit tak jakékoliv zapojení tyčinek do cirkadiálního stimulu. Tento proces odštíhnutí tyčinek se projeví v modelu na obrázku 1.12 druhým ostrým vrcholem při 507 nm, který je jeho nedílnou součástí. Pro vlnové délky větší než cca 500 nm se uplatňují pouze primární buňky ipRGCs s maximem citlivosti v 480 nm. Pro menší hodnoty vlnových délek pracuje model navíc s citlivostí S jodopsinu (vrchol ve 440 nm - viz obr. 1.7) a je také aktivován a zapojen fotopigment tyčinek rhodopsin [5, 7, 9].



Obrázek 1.11: M. S. Rea *et al.*: Schéma propojení jednotlivých fotopigmentů lidského oka. Převzato a upraveno z [9].

Citlivost lidského oka na světlo, které ovlivňuje cirkadiální aktivitu je na obrázku 1.12. Jedná se o aktualizovanou verzi modelu, která byla publikována začátkem roku 2012 v [7]. Oproti té je zde zahrnuta v citlivosti melanopsinu i propustnost čočky lidského oka⁷ a jsou upraveny některé koeficienty výpočtu a jejich hodnoty.

⁷Při procesu stárnutí člověka jeho čočka (zornice) oka žloutne a její propustnost s věkem klesá, více v části 1.7.8 Metoda α -osvětlení.



Obrázek 1.12: M. S. Rea *et al.*: Citlivost cirkadiánního systému. Zohledněn příspěvek tyčinek i čípků. Převzato a upraveno z [9].

Základem je matematický výpočet cirkadiánního světla (circadian light) dle následujících vzorců

Když

$$\int \frac{S_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda - k \int \frac{V_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda \geq 0, \quad (1.1)$$

pak

$$CL_A = 1622 \left[\int M_{c_\lambda} E_\lambda d\lambda + \left(a_{b-y} \left(\int \frac{S_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda - k \int \frac{V_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda \right) - a_{rod} \left(1 - e^{-\frac{\int V'_\lambda E_\lambda d\lambda}{RodSat}} \right) \right) \right]. \quad (1.2)$$

Když

$$\int \frac{S_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda - k \int \frac{V_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda < 0, \quad (1.3)$$

pak

$$CL_A = 1622 \int M_{c_\lambda} E_\lambda d\lambda, \quad (1.4)$$

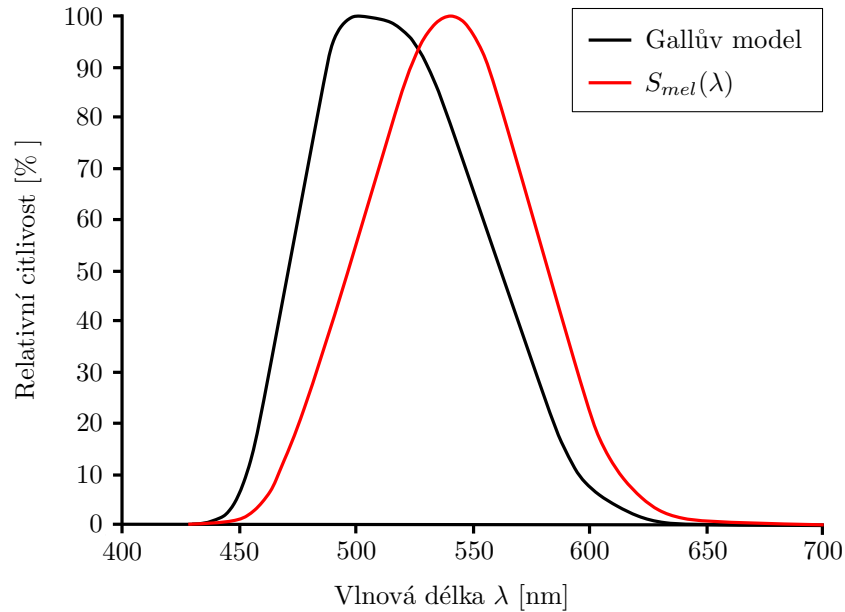
kde:

CL_A	je cirkadiánní světlo, hodnota 1622 nastavuje normalizaci veličiny tak, aby teplotní zářič s teplotou chromatičnosti 2856 K při intenzitě 1000 lx měl hodnotu $CL_A = 1000$,
E_λ	je spektrální složení zdroje světla $\frac{W/m^2}{nm}$,
Mc_λ	je citlivost melanopsinu,
S_λ	je funkce zohledňující příspěvek S jodopsinu,
mp_λ	je transmisivita makulárního pigmentu sítnice ^a ,
V_λ	je křivka poměrné spektrální citlivosti lidského oka pro fotopické vidění,
V'_λ	je křivka poměrné spektrální citlivosti lidského oka pro skotopické vidění,
$RodSat$	je konstanta vyjadřující absorpci jednoho fotonu molekulou pigmentu vyskytujícího se v tyčinkách, v tomto případě se rovná hodnotě $6,5 \frac{W}{m^2}$,
k	je koeficient roven hodnotě 0,2616,
a_{b-y}	je koeficient roven hodnotě 0,6201,
a_{rod}	je koeficient roven hodnotě 3,2347.

^aV latinském jazyku znamená *Macula* žlutá skvrna oka. Makulární, oční pigment sítnice je umístěn v zadní části oka na sítnici a hraje velkou roli při ochraně čípků a tyčinek.

Dalším důležitým bodem ve vývoji spektrální citlivosti oka člověka byla konference The 1st International Workshop on Circadian and Neurophysiological Photometry, která se konala ve Vídni v lednu 2013. Na místě se sešli vědečtí experti jako R.J. Lucas, D.M. Berson, M.G. Figueiro, G.C. Brainard, I. Provencio, C.A. Czeisler a další. Jedním z výstupů konference je definice citlivosti jednotlivých opsinů lidského oka zobrazena na obrázku 1.7. K čemuž navazuje metoda α -osvětlení, která umožňuje zjistit citlivost jednotlivých fotopigmentů na uživatelem zadané spektrální složení světelného zdroje, více v části 1.6.6. Na této události je opět prohlášeno nepřímé propojení tyčinek a čípků s ipRGCs za existující [14]. Dále je založen poslední v této práci zmíněný model cirkadiánní citlivosti. Je obsahem normy DIN SPEC 5031–100: Záření v optické oblasti a světelné technice: Melanopické působení světla na oko člověka–základní pojmy, výpočty a spektrální působení, vydané v srpnu 2015. Jedná se o lineární model označovaný jako $s_{mel}(\lambda)$ na obrázku 1.13. Data ke křivce pochází z publikace [13], maximum citlivosti je opět při hodnotě vlnové délky 480 nm. Stejně jako v předchozí křivce publikované M. S. Rea (viz obr. 1.12) je zahrnut příspěvek tyčinek a čípku k cirkadiánní aktivitě. Také změna propustnosti zornice v závislosti na věku člověka je zohledněna. V tomto případě je křivka na obrázku 1.13 vztažena ke standartnímu pozorovateli ve věku 32 let, u kterého se koeficient zohlednění propustnosti zornice pro přepočítání rovná 1^8 [13, 14, 27, 32].

⁸Během stárnutí člověka žlutné čočka jeho oka, což vede ke snížení propustnosti světla cca o 10 % s každými dalšími 10 lety [4].



Obrázek 1.13: DIN 5031–100: Lineární model spektrální citlivost cirkadiálního systému $s_{mel}(\lambda)$. Pro srovnání vykreslen také lineární model Dietricha Galla z obrázku 1.10. Převzato a upraveno z [32].

Křivka citlivosti lidského oka patří neodmyslitelně k pojmu Human Centric Lighting. Určuje jaká část viditelného záření nejvíce ovlivňuje psychologický a fyziologický stav lidského těla. Proto byla tomuto tématu věnována značná část obsahu diplomové práce. Aby bylo možné ovlivňovat biologické hodiny člověka, je nutné osvětlovat jeho sítnici určitým spektrálním složením světla závisle na vykonávané činnosti nebo denní či noční době, konkrétněji v podkapitole 1.8. Při samotném návrhu desky plošných spojů (také DPS) svítidla je důležité vybrat takové LED světelné zdroje, aby bylo možné jejich kombinací dosáhnout požadovaného spektrálního složení zdroje. Na citlivost cirkadiálního systému navazuje dále část 2.2.3, která se zabývá řízením spektrálního složení zdroje svítidla v čase. Na závěr podkapitoly je nutno podotknout, že pravděpodobně chybí ještě spousta informací k úplnému pochopení vlivu světla na cirkadiální systém. Existuje zde ještě mnoho pochybností a nezodpovězených otázek. Například při výzkumu bylo zjištěno, že spektrální citlivost cirkadiálního systému se během noci mění [7, 14]. Také světelná historie a to, jak bylo lidské oko v minulosti vystavováno jakému světlu, hraje důležitou roli v cirkadiální citlivosti [7, 14]. V očních fotoreceptorech se vyskytují pravděpodobně i další fotopigmenty podílející se na řízení biorytmu. Mezi nejvýznamnější patří peropsin nebo třeba kryptochromy. Ale tyto proteiny byly prozatím nalezeny pouze u rostlin nebo u hmyzu. To zda se vyskytují i u lidí a dalších savců a jestli nějakým způsobem ovlivňují cirkadiální rytmus, není jasné [21]. Doposud není normováno, ani jednoznačně určeno kompletní spektrum citlivosti nevizuálního systému lidského vidění, které by zahrnovalo všechny možné okolní podmínky [14]. Avšak vzhledem k velkému vlivu krátkovlnného světla na spousta dějů v lidském organismu a následnému využití ve zdravotnictví, je třeba se nadále intenzivně zabývat touto problematikou.

1.5 Možné způsoby měření vlivu světla na člověka

Vlivem světla na člověka a jeho zrakový systém se zabývá fotometrie. Ta popisuje vliv světla pomocí fotometrických veličin, které jsou vztaženy k normalizovanému CIE pozorovateli. Citlivost oka CIE pozorovatele k různým vlnovým délkám je stanovena podle toho, zda zraková činnost probíhá ve dne, v noci nebo za jejich přechodu (fotopické, skotopické a mezopické vidění). Naprostá většina zařízení pro měření fotometrických veličin má tedy veškeré vnitřní softwarové výpočty (intenzitu osvětlení, svítivost, teplotu chromatičnosti a další) vztaženy ke křivce denního vidění $V(\lambda)$ s možností nastavení na citlivost skotopického vidění $V'(\lambda)$. Fotoreceptory ipRGCs reagují ale na kratší vlnové délky než tyčinky a čípky, jak bylo již popsáno v podkapitole 1.4. Pro účely zjištění vlivu světla na člověka z pohledu nevizuálního vidění a jeho cirkadiálních rytmů je proto potřeba počítat fotometrické veličiny vztažené k citlivosti na gangliové buňky a cirkadiální čidla namísto čípků a denního vidění. Speciální měřicí přístroje kalibrované na citlivost cirkadiálního systému jsou nyní vyvíjeny. Jednotná metodika měření prozatím neexistuje. V současnosti existuje několik výpočtových metod a navrhovaných proměnných pro hodnocení vlivu na nevizuální systém. Několik z nich bude představeno v částech 1.6.5 až 1.6.7. O některých bude dále pojednáno v této kapitole.

Jednou z možností, jak provádět měření vlivu světla na člověka a jeho nevizuální systém je použití běžných fotometrických přístrojů upravených na poměrnou spektrální citlivost $s_{mel}(\lambda)$. Dalším způsobem je individuální provedení výpočtu fotometrických veličin s úmyslem použít jako vstupní data do výpočtu spektrální složení světla, tedy data v podobě závislosti celkového zářivého toku elektromagnetického záření na vlnové délce světla. Spektrální složení světla je závislost poměrné spektrální hustoty zářivého toku $\varphi_{e\lambda}$ v jednotkách $\frac{W}{m^2}$ na vlnové délce λ [nm]. Výhodou je variabilita nastavení spektrální citlivosti oka pozorovatele dle vlastního uvážení. Přibývá zde totiž možnost rozhodnout, jakou křivku spektrální citlivosti lidského oka použít. Vliv světla na nevizuální zrakový systém člověka je v této práci posuzován tímto způsobem. Existují však zařízení, která jsou na měření schopnosti světelného zdroje ovlivňovat náš cirkadiální rytmus přizpůsobena:

1. Kamera se speciálním filtrem adaptovaným na citlivost cirkadiálních čidel: umožňuje měřit činitel cirkadiální účinnosti a_{cv} a podle velikosti ho rozložit do prostoru [21].
2. Trichromatický kolorimetr: spektrální citlivost fotočlánku měřícího velikost trichromatické složky Z (modrá barva) je přibližně stejná jako křivka $C(\lambda)$, trichromatická složka Y (zelená barva) odpovídá křivce $V(\lambda)$ [21].
3. Cirkadiální dozimetr (Daysimeter, LuxBlick): zařízení vyvinuto pouze pro účely zkoumání vlivu světla na cirkadiální rytmus během výzkumných experimentů. Jedná se o malý přístroj připevněný za uchem, po celý den zaznamenávající v intervalu desítek sekund parametry dopadajícího světla v jednotkách C_{LA} (z anglického circadian light).

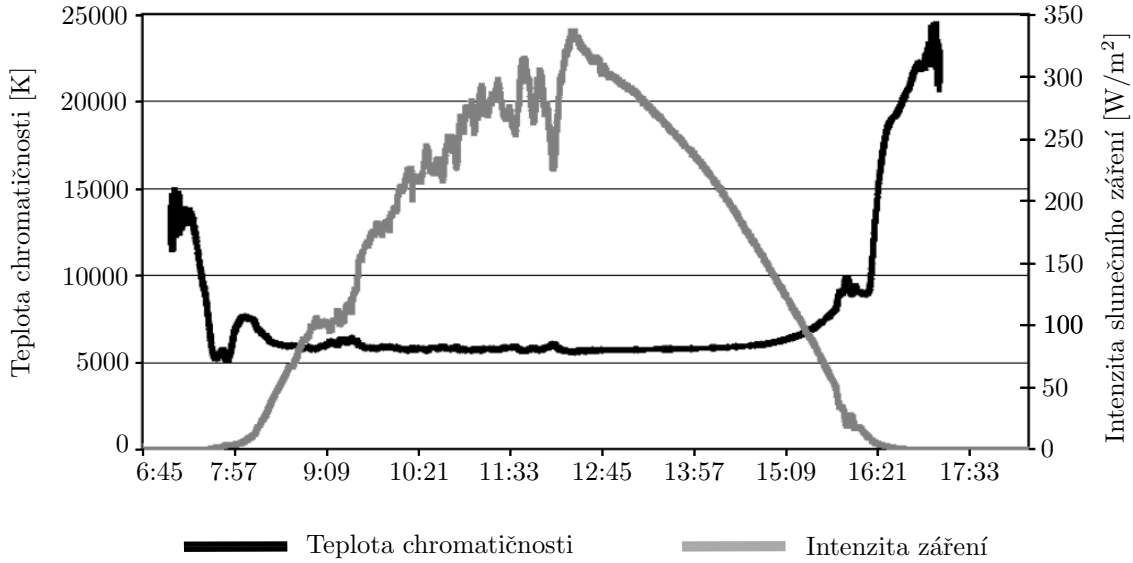
1.6 Kritéria hodnotící kvalitu návrhu osvětlení

V této podkapitole bude představeno několik parametrů, podle kterých lze hodnotit, jak kvalitu návrhu svítidla, tak osvětlení prostoru jako celku. V praktické části zabývající se návrhem svítidla a využití svítidla v interiéru se bude s těmito parametry a veličinami často pracovat a budou používány převážně k hodnocení kvality návrhu. První část podkapitoly se zabývá veličinami, které hodnotí kvalitu světla vyzařovaného svítidlem. V druhé části budou uvedeny veličiny hodnotící nevizuální vjem světla na lidský organismus a důležitou část svítidla, která reprezentuje téma Human centric Light.

1.6.1 Teplota chromatičnosti

Teplota chromatičnosti ovlivňuje vnímání prostoru z hlediska zrakové pohody. Vychází z fyziologických aspektů zrakového vnímání respektující změnu teploty chromatičnosti světla během denního cyklu. Teplota chromatičnosti, také T_{ch} s jednotkou 1 K (Kelvin), je velmi důležitý parametr svítidla udávaný v jeho popisu téměř vždy. Norma ČSN EN 12646–1 uvádí hodnoty teploty chromatičnosti vhodné pro některé konkrétní osvětlované prostory [34]. Podobné doporučení lze dohledat ve velkém množství článků, textů a akademických prací, které uvádí hodnoty teploty chromatičnosti podle činnosti, která se obvykle v osvětlovaném prostoru vykonává nebo podle typu prostoru bytové jednotky. Velká většina těchto informačních zdrojů doporučují používat v ložnici a obývacím pokoji nízkou hodnotu teploty chromatičnosti v kombinaci s nízkou intenzitou osvětlení. Naopak vysoká teplota chromatičnosti a vysoká hodnota intenzity osvětlení je vhodná v místnostech každodenních aktivit, v kuchyni, pracovní nebo posilovně. V následujícím textu bude objasněno, proč a podle čeho je to takto doporučováno.

Nejpřirozenějším zářením pro zrakový vjem je denní světlo [4]. Cílem návrhu svítidla v trendu HCL by mělo být tedy za prvé imitovat barvu chromatičnosti světelného zdroje blízkému dennímu světlu a za druhé napodobit jeho změny během dne. Obrázek 1.14 zobrazuje průběh intenzity osvětlení a teploty chromatičnosti denního světla během jednoho dne. Data jsou pořízena odborníky z ústavu Elektroenergetiky na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně. Den začíná velmi vysokou hodnotou teploty chromatičnosti (12 000–15 000 K) vůbec ještě před východem slunce. Tento časový úsek se někdy nazývá “modrá hodina“ a vyskytuje se také po západu slunce. Tehdy je barevná teplota denního světla vůbec nejvyšší z celého dne, avšak s velmi malou hodnotou osvětlenosti. Po “modré hodině“ nastává východ slunce, který je při jasné obloze typický nízkými hodnotami teploty, cca 3000 K. Jak stoupá slunce na obloze, teplota chromatičnosti roste k vyšším hodnotám, až dosáhne obvykle cca 6000 K v poledne dne při osvětlenosti 50 000–60 000 lx. S večerem opět klesá osvětlenost a stoupá teplota chromatičnosti. Na konci dne je teplý západ slunce a den ukončuje opět “modrá hodina“. Je nutno podotknout, že zmíněný průběh teploty chromatičnosti během dne (obr. 1.14) se v průběhu celého roku liší a závisí na mnoha faktorech. Propustnost atmosféry se mění s aktuálním počasím, rozptylem slunečního záření v atmosféře, ročním obdobím nebo úhlem elevace slunce na obloze [35]. Teplota chromatičnosti umělého osvětlení by měla mít tedy stejný průběh jako denní světlo [4]. To vysvětluje, proč se doporučuje v ložnici a obývacím pokoji, kde se lidé zdržují ve večerních hodinách nízká a uklidňující teplota T_{CH} stejná jako při západu či východu slunce. A naopak v kuchyni se doporučují vyšší hodnoty teploty chromatičnosti a intenzity k povzbuzení aktivity při vaření či umývání nádobí. Důležitá je také dostatečně vysoká hladina osvětlenosti prostoru stejně jako je tomu přes den.



Obrázek 1.14: Graf průběhu teploty chromatičnosti T_{ch} a intenzity slunečního záření během jednoho dne v časovém úseku od 6:45 do 17:33 hodin. Převzato z [35].

Teplota chromatičnosti může být ze spektrálního složení světla vypočítána více způsoby. Postup výpočtu jednoho z nich je v této části popsán. Výstupními daty z fotometrického přístroje při měření světelného zdroje je obvykle závislost poměrné spektrální hustoty zářivého toku $\varphi_{e\lambda}$ na vlnové délce λ , neboli spektrální složení světla. K jednoduššímu popisu a následnému zpracování se nejčastěji používají tzv. trichromatické složky. Ty lze vypočítat násobením poměrné spektrální hustoty zářivého toku $\varphi_{e\lambda}$ kolorimetrickými koeficienty a následně integrací těchto součinů v celé oblasti spektrálního složení zdroje. Například v soustavě XYZ se složky stanoví ze vzorců [10]

$$X = \int_0^{\infty} \varphi_{e\lambda}(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda, \quad (1.5)$$

$$Y = \int_0^{\infty} \varphi_{e\lambda}(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda, \quad (1.6)$$

$$Z = \int_0^{\infty} \varphi_{e\lambda}(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda, \quad (1.7)$$

kde \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} jsou kolorimetrické koeficienty, které jsou numerickým popisem spektrální citlivosti oka pozorovatele na barevný podnět. Hodnota \bar{y} je pouze jiné značení pro známou $V(\lambda)$ křivku. Může nastat i případ, kdy jsou výstupem z měření souřadnice barevného prostoru RGB. V takovém případě je nutný přepočítání z RGB souřadnic na trichromatické složky X, Y, Z dle rovnic 1.8 až 1.10 [10]

$$X = (-0.14282) \cdot (R) + (1.54924) \cdot (G) + (-0.95642) \cdot (B), \quad (1.8)$$

$$Y = (-0,32466) \cdot (R) + (1,57837) \cdot (G) + (-0,73191) \cdot (B) = \text{intenzita osvětlení}, \quad (1.9)$$

$$Z = (-0,68202) \cdot (R) + (0,77073) \cdot (G) + (0,56332) \cdot (B). \quad (1.10)$$

Jedním z možných způsobů výpočtu T_{CH} je použití McCamyho polynomu [36] pro výpočet teploty chromatičnosti zdrojů blízkých Planckově křivce zářičů, nazývané také křivka teplotních zářičů. Pro výpočet teploty chromatičnosti v rozmezí od 2900 K do 6500 K dává tento polynom velmi přesný výsledek s odchylkou pod 2 K [36]. Se vzdalováním světelného zdroje od Planckovy čáry teplotních zářičů přestává McCamyho vzorec platit a je potřeba použít jiné metody výpočtu. McCamyho polynom [36] se vypočítá podle

$$T_{ch} = 449n^3 + 3525n^2 + 6823,3n + 5520,33, \quad (1.11)$$

kde:

$$n = \frac{x - 0,3320}{0,1858 - y}. \quad (1.12)$$

Vzorce pro výpočet trichromatických souřadnic x, y, z [10], díky kterým lze zapsat souřadnice do 2D diagramu nazývaného kolorimetrický trojúhelník jsou

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}, \quad (1.13)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}, \quad (1.14)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}. \quad (1.15)$$

1.6.2 Odchylka D_{uv} a Δ_{uv}

V předchozí části bylo objasněno, jak je teplota chromatičnosti pro návrh svítidla důležitá a jakým způsobem jí lze stanovit. V této části jsou představeny dvě odchylky, které jsou úzce spjaty s teplotou chromatičnosti. Pokud má být výstupem ze svítidla bílé světlo, je nutné se pohybovat v největší blízkosti čáry teplotních zářičů v kolorimetrickém trojúhelníku. Odchylku od této křivky lze vyjádřit pomocí hodnoty D_{uv} . Jedná se o vzdálenost teploty chromatičnosti hodnoceného světla od Planckovy křivky. Tato vzdálenost je měřena na normále ke křivce teplotních zářičů v daném bodě, jak je vyobrazeno na obrázku 1.15. Hodnota D_{uv} může tedy nabývat kladných i záporných reálných čísel podle toho, zda odchylka směřuje po normále nahoru (kladná hodnota) nebo dolů (záporná hodnota) od Planckovy křivky. D_{uv} lze stanovit pomocí aproximační formule, která je obsahem amerického národního standartu ANSI C78.377-2011 [37]. Formule je určena pro teploty chromatičnosti od 2500 K do 20 000 K. Vstupem do výpočtu jsou pouze u, v souřadnice barevného systému CIE 1960 a 6 pevně daných konstant značených k_1 až k_6 . Výpočet se provádí dle následujících vzorců [37]

$$L_{FP} = \sqrt{(u - 0,292)^2 + (v - 0,240)^2}, \quad (1.16)$$

$$a = \arccos\left(\frac{u - 0,292}{L_{FP}}\right), \quad (1.17)$$

$$L_{BB} = k_6 a^6 + k_5 a^5 + k_4 a^4 + k_3 a^3 + k_2 a^2 + k_1 a + k_0, \quad (1.18)$$

$$D_{uv} = L_{FP} - L_{BB}, \quad (1.19)$$

kde:

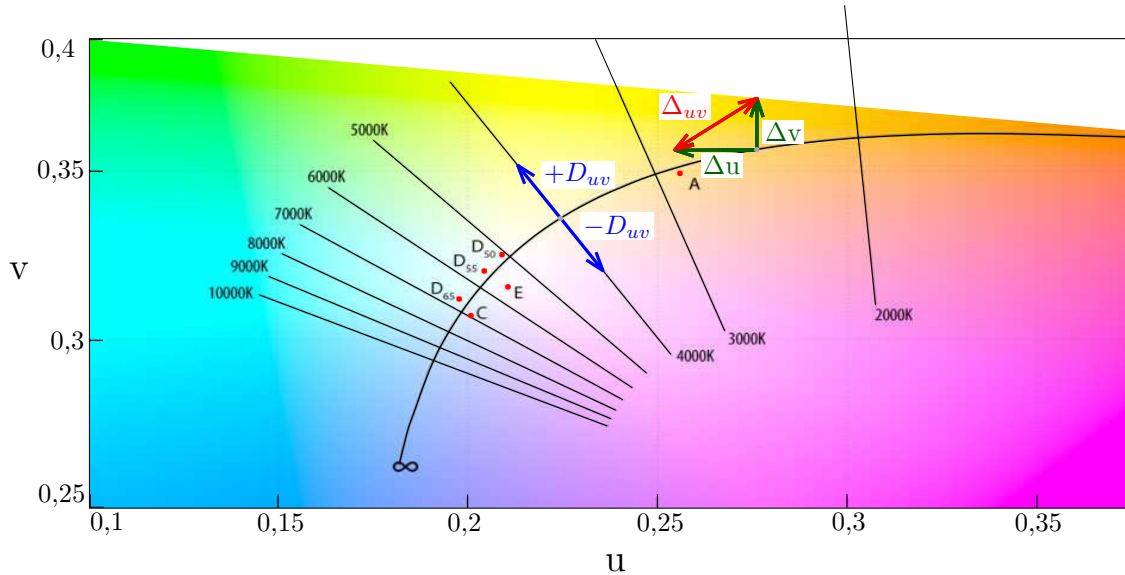
$$\begin{aligned}
k_0 &= -0,471106, & k_4 &= -0,5179722, \\
k_1 &= 1,925865, & k_5 &= 0,0893944, \\
k_2 &= -2,4243787, & k_6 &= -0,00616793, \\
k_3 &= 1,5317403.
\end{aligned}$$

Souřadnice u, v lze vypočítat pomocí [10]

$$u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}, \quad (1.20)$$

$$v = \frac{6y}{-2x + 12y + 3}. \quad (1.21)$$

V běžné praxi při návrhu nebo měření odchylky D_{uv} je vždy stanovena limitní hranice, kdy se barva světla ještě považuje za bílou. Pokud je tato hranice překročena, barva světelného zdroje je příliš vzdálená od Planckovy křivky a zdroj se stává spíše barevným než bílým. Se vzdalováním zdroje od Planckovy křivky zářičů přestává dokonce platit metoda výpočtu indexu podání barev R_a pro bílé světelné zdroje (část 1.6.3). Dle publikace Pacific Northwest National Laboratory [27] je s ohledem na teplotu chromatičnosti hranice hodnoty D_{uv} pro bílou barvu $\pm 0,006$. Americká národní asociace elektrotechnických výrobců (National Electrical Manufacturers Association) doporučuje v [37] používat pro hodnoty teplot chromatičnosti 2700 K, 3000 K, 3500 K, 4000 K limit také $\pm 0,006$. Yoshi Ohno, prezident mezinárodní komise pro osvětlování CIE označuje hodnotu $D_{uv} = \pm 0,007$ jako nepreferovanou a za neakceptovatelné číslo považuje $D_{uv} = \pm 0,015$ při indexu podání barev $R_a = 85,3$.



Obrázek 1.15: Barevný prostor CIE uv 1960: V MacAdamově diagramu zakreslena černou barvou čára teplotních zářičů s vyznačenými čarami konstantních teplot chromatičnosti T_{ch} . Normalizovaný zdroj A odpovídá umělému světlu žárovky (teplotní zářič), písmeno E značí nerealizovatelné izoenergetické světlo. Denní světlo bez přímého slunečního záření o teplotě cca 6500 K je značeno písmenem C. Označení D50, D55, D60 vyjadřuje spektrální složení průměrného poledního denního světla (část 1.8.11). Normalizované zdroje světla. Převzato a upraveno z [38].

Druhá, avšak ne tak používaná odchylka se značí Δ_{uv} . Lze ji nalézt i pod zkratkou DC z anglického výrazu chromaticity distance. Hodnota Δ_{uv} se počítá dle vzorce 1.22 a vyjadřuje pouze vzdálenost hodnoceného světelného zdroje od zvoleného bodu na Planckově křivce, obrázek 1.15. Ve specifikaci CIE 13.3 – 1995 je uvedeno jako limitní číslo odchylky $\Delta_{uv} = \pm 0,0054$. Pro větší hodnoty není přesnost metody výpočtu indexu podání barev R_a v normě uvedena.

$$DC = \Delta_{uv} = \sqrt{(u_r - u_t)^2 + (v_r - v_t)^2}, \quad (1.22)$$

kde:

- u_r je souřadnice referenčního zdroje světla,
- v_r je souřadnice referenčního zdroje světla,
- u_t je souřadnice testovaného zdroje světla,
- v_t je souřadnice testovaného zdroje světla.

Při návrhu je důležité správně užívat tyto dvě odchylky. Jednou možností je pracovat s hodnotou D_{uv} a zároveň si hlídat změnu teploty chromatičnosti ΔT_{ch} . Druhá varianta znamená hodnotit pouze odchylku Δ_{uv} , která je přeponou trojúhelníku vzniklému z hodnot Δu a Δv vyobrazenému na obrázku 1.15. Zásadní je pracovat s těmito dvěma hodnotami uvážlivě a zvolit si tu, která je dle aplikace a potřeby vhodnější. Dodržení hraničních hodnot odchylek D_{uv} a Δ_{uv} zaručí, že výsledná barva světelného výstupu je bílá.

1.6.3 Hodnocení vjemu barvy

Barva jakéhokoliv předmětu a její vjem je ovlivněn mnoha faktory. Mezi tyto faktory patří například spektrální činitel odrazu pozorovaného předmětu, aktuální stav adaptace zraku, citlivost čípků k jednotlivým vlnovým délkám světla nebo světelný zdroj, kterým je pozorovaný předmět osvětlován. Vjem barvy charakterizuje z velké části i spektrální složení tohoto zdroje. Vliv světelného zdroje a jeho spektrálního složení popisuje všeobecný index podání barev R_a (také speciální index podání barev R_i jednotlivých srovnávacích vzorků, tedy $i = 1, 2, \dots, 14$), který porovnává spektrum zdroje osvětlujícího předmět se smluvním (referenčním) zdrojem [10]. Tento referenční zdroj má maximální a ideální hodnotu indexu R_a rovnu 100. Naopak v monochromatickém žlutém světle nízkotlakých sodíkových výbojek barvy už nelze rozlišit, v takovém případě se pak $R_a = 0$. Pro teploty chromatičnosti do 5000 K se používá jako referenční zdroj model žárovkového světla, který má přibližně stejné záření, jako záření dokonale černého tělesa, nebo-li ideálního teplotního zářiče. Slunce a jeho vyzařování lze zjednodušeně považovat za dokonalé černé těleso [39]. Jeho povrchová teplota je přibližně 5700 K a nejvíce vyzařené sluneční energie připadá na vlnovou délku 500 nm [39]. Lidské oko je přitom nejvíce citlivé na vlnovou délku 555 nm dle křivky $V(\lambda)$. Nelze tedy přehlédnout důkaz genetického přizpůsobení citlivosti lidského oka přímo na sluneční záření. Při teplotách barvy vyšších jak 5000 K se však při výpočtu indexu R_a pracuje s denním spektrem světla, které je reprezentováno standartizovaným světlem CIE D. Metoda hodnocení všeobecného indexu podání barev R_a dle publikace Mezinárodní komise pro osvětlování CIE 13.3–1995 (CIE, 1995) je založena na číselném vyjádření rozdílu vjemu barvy vybraného souboru 8 barevných vzorků při postupném osvětlování hodnoceným a smluvním zdrojem. Barevných vzorků existuje celkem 14, viz obrázek 1.16. Při návrhu byl pro hodnocení kvality světla počítán index R_a běžným způsobem dle [14] s použitím osmi či čtrnácti barevných vzorků. Speciální index podání barev pro každý vzorek zvlášť lze vyjádřit pomocí

$$R_i = 100 - 4,6 \cdot \Delta E_i, \quad (1.23)$$

$$\Delta E_i = \sqrt{(U_{oi} - U_{ki})^2 + (V_{oi} - V_{ki})^2 + (W_{oi} - W_{ki})^2}. \quad (1.24)$$

Všeobecný index podání barev R_a se určí vztahem

$$R_a = 100 - 4,6 \cdot \Delta E_a, \quad (1.25)$$

$$\Delta E_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta E_i, \quad (1.26)$$

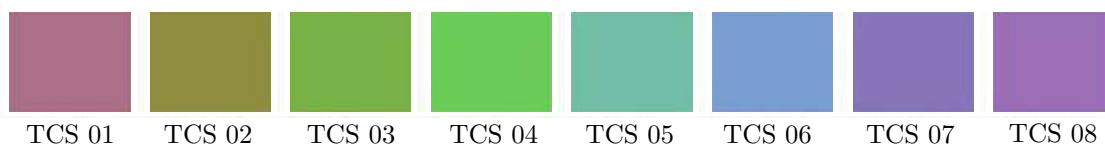
kde:

U_{oi}, V_{oi}, W_{oi} jsou trichromatické složky popisující v soustavě UVW barevný vjem i -tého vzorku ($i= 1,2,3,\dots,8$) při osvětlení srovnávacím (referenčním) zdrojem,

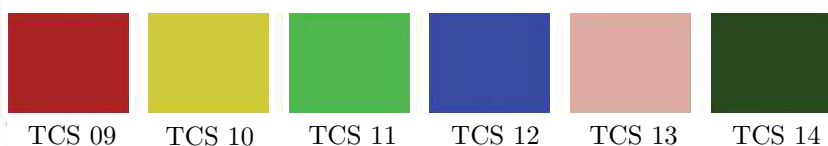
U_{ki}, V_{ki}, W_{ki} jsou trichromatické složky popisující v soustavě UVW barevný vjem i -tého vzorku při osvětlení zkoušeným (testovaným) zdrojem,

n je počet použitých barevných vzorků.

Barevné vzorky R_1 až R_8 pro hodnocení vjemu barvy pomocí R_a



Doplňující barevné vzorky R_9 až R_{14}



Obrázek 1.16: Referenční barevné vzorky používané pro výpočet indexu podání barev R_a . Převzato a upraveno z [40].

Je důležité poznamenat, že nejvyšší hodnota indexu podání barev R_a 100 neznámá dokonalé světlo nebo ideální barevný vjem pro každou aplikaci, tato hodnota pouze vyjadřuje, jak moc je hodnocené světlo podobné referenčnímu. Pokud při konkrétní aplikaci referenční světlo nevytváří vhodný barevný vjem, nemusí znamenat hodnota $R_a = 100$ nejlepší výsledek. Například při hodnocení LED světelného zdroje o teplotě chromatičnosti 4800–4900 K s cílem napodobit denní spektrum světla bude stále referenčním zdrojem Planckův zářič (žárovkové světlo, standartizované světlo CIE A). Metoda hodnocení vjemu barvy R_a tedy srovnává LED zdroj se žárovkovým světlem. Přičemž nejlepší výsledek ($R_a = 100$) nastane, když srovnávaný LED světelný zdroj bude shodný s teplotním zářičem. Cílem je ale dosáhnout denní spektrum světla, nikoliv spektrum žárovkového světla. Při návrhu svítidla je důležité mít povědomí o tomto rozporu a být si vědom, že dosažení nejvyšší možné hodnoty podání indexu barev nemusí vždy zaručit správný výsledek [41, 42]. Dalším nedostatkem této metody hodnocení barevného vjemu je použití pouze 8 zmíněných vzorků k hodnocení i přesto, že dnes je jich dostupné nepřeberné množství. Navíc jsou

barvy těchto 8 vzorků pastelové, nesaturované, mají tedy vysoký podíl bílé složky a vůbec nezhlednější reflexní vlastnosti materiálu [33, 41, 43]. Zásadním omezením metody je také fakt, že lze srovnávat pouze zdroje se stejnou teplotou chromatičnosti, tedy hodnocený zdroj musí mít stejnou T_{CH} jako referenční [42, 43]. V návaznosti na tyto nedostatky byla vydána mezinárodní norma CIE 224:2017 Colour Fidelity Index for accurate scientific use (Index barevné reprodukce/přesný barevný index pro vědecké použití), která řeší tyto nedostatky a poskytuje i několik dalších výhod. Obdobou je také dokument IES TM-30 [33] vydaný roku 2015 americkou IES (Illuminating Engineering Society) zabývající se totožným tématem.

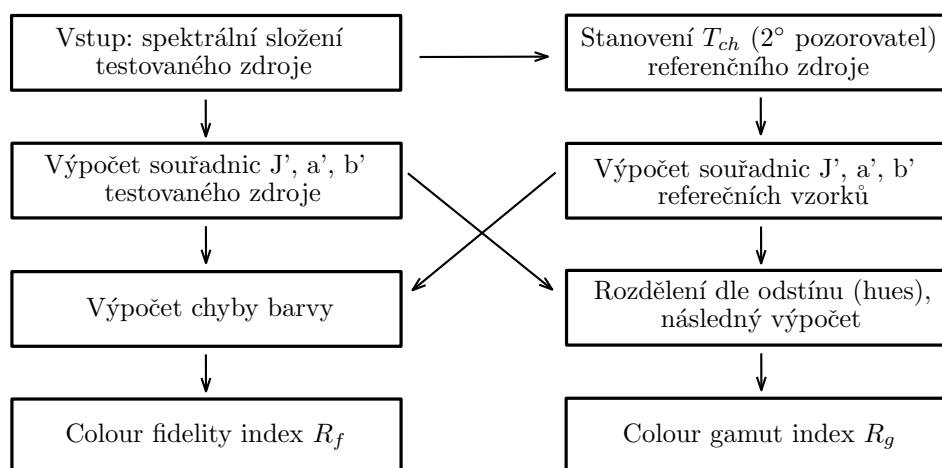
CIE 2017: Colour Fidelity index R_f (CFI)

Colour Fidelity index R_f je přesný index barevné shodnosti hodnoceného zdroje s referenčním zdrojem určený k vědeckému použití převážně pro bílé zdroje světla. Index R_f v žádném případě nenahrazuje index podání barev R_a , ani pro účely specifikace produktu, ani pro hodnocení barevného vjemu. Jde v podstatě pouze o vylepšený index R_a . Je vhodné jej používat jako doplněk pro získání přesnějších a věrohodnějších výsledků o kvalitě barvy bílých světelných zdrojů. Schéma na obrázku 1.17 vyjadřuje metodu výpočtu indexů R_f a R_g . Samotný konečný výpočet se provádí dle následujících vzorců [33, 42]

$$R_f = 10 \cdot \ln[\exp\left(\frac{100 - 6,73 \cdot \Delta E_a}{10}\right) + 1], \quad (1.27)$$

$$R_{f,i} = 10 \cdot \ln[\exp\left(\frac{100 - 6,73 \cdot \Delta E_i}{10}\right) + 1]. \quad (1.28)$$

Vážený faktor 6,73 v těchto rovnicích byl zvolen tak, aby průměrné hodnoty CFI běžně používaných světel byly podobné hodnotám R_a a dalo se pracovat s oběma těmito indexy zároveň. Výsledné hodnoty vzorců 1.27 a 1.28 nemohou nabývat záporných čísel. U indexu R_a při hodnotě $\Delta E_i > 22$ mohl výsledek nabývat záporných hodnot [33, 42].



Obrázek 1.17: Schéma metody výpočtu indexů hodnotící vjem barvy R_f a R_g . Podle [33].

Metoda používá pro srovnání nový referenční zdroj určený pro teploty chromatičnosti v rozmezí od 4000 K do 5000 K. Tento zdroj je lineární kombinací Planckového zářiče a normalizovaného denního světla dle vzorce 1.29 [33, 42]. V praxi může být často vhodnější použít jako referenční

srovnávací zdroj pro hodnoty těsně pod 5000 K denní spektrum světla namísto Planckova zářiče, který je při výpočtu indexu podání barev R_a určen pro hodnoty pod 5000 K. Nový referenční zdroj řeší tedy tuto omezující podmínku v podobě ostré hranice 5000 K.

$$S_r(\lambda) = \frac{T_{ch} - 4000}{1000} \cdot S'_{r,D}(\lambda) + \frac{5000 - T_{ch}}{1000} \cdot S'_{r,P}(\lambda), \quad (1.29)$$

kde:

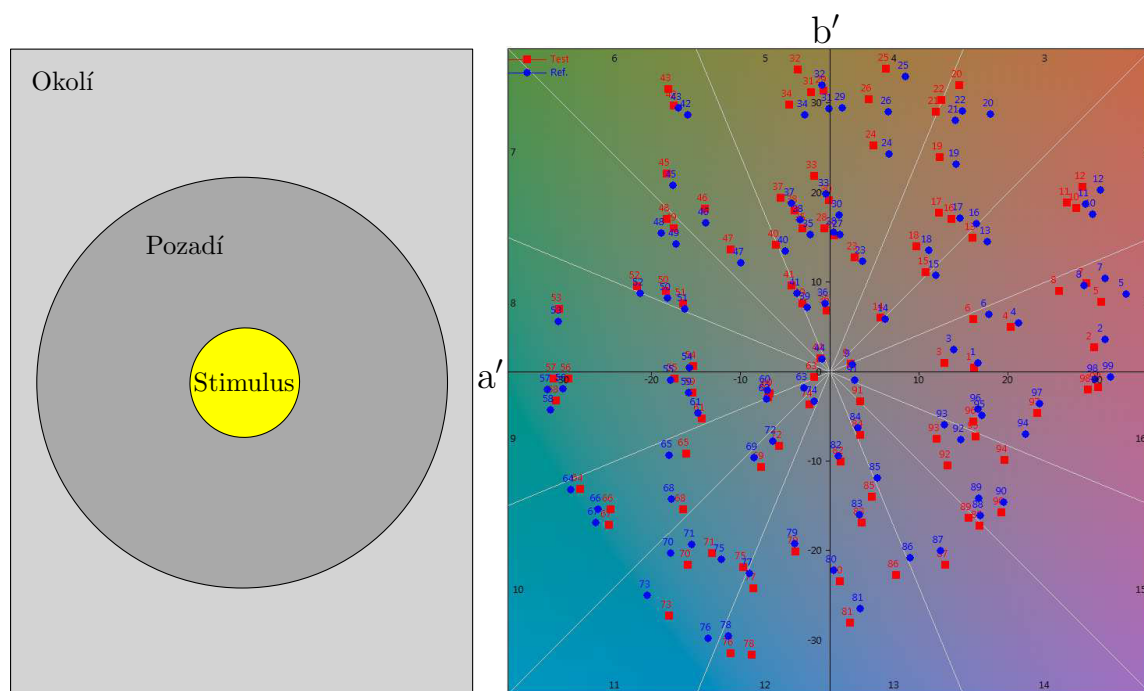
T_{ch} je teplota chromatičnosti,

$S'_{r,D}(\lambda)$ je spektrální složení normalizovaného světla zdroje D (denního světla),

$S'_{r,P}(\lambda)$ je spektrální složení Planckova zářiče.

Barevný systém CIECAM02–UCS

Colour Fidelity Index R_f používá barevný systém CIECAM02–UCS, který byl vyvinut pro účely experimentů s barvami a jejich hodnocením. Základní souřadnice systému jsou J' (světelnost, může nabývat hodnot 0 až 100), a' (zeleno–červená osa), b' (žluto–modrá osa), viz obrázek 1.18. Systém umožňuje hodnotit barevné rozdíly svítidel s odlišnou teplotou chromatičnosti. Pracuje s hodnotami adaptačního jasu, jasu pozadí, pestrobarevností, saturací, odstínem barvy a dalšími vlastnostmi obecně charakterizujícími barvu. Hlavní oblast hodnocení barevného vjemu (stimulus) používá CIE standartního pozorovatele 2° . Pozadí využívá oblast CIE standartní uživatel 10° , kde je například možné zadat adaptační jas tohoto pozadí. Hodnocení vjemu barvy světla se potom provádí s ohledem na jasové podmínky v okolí pozorovatele [33, 42, 43].



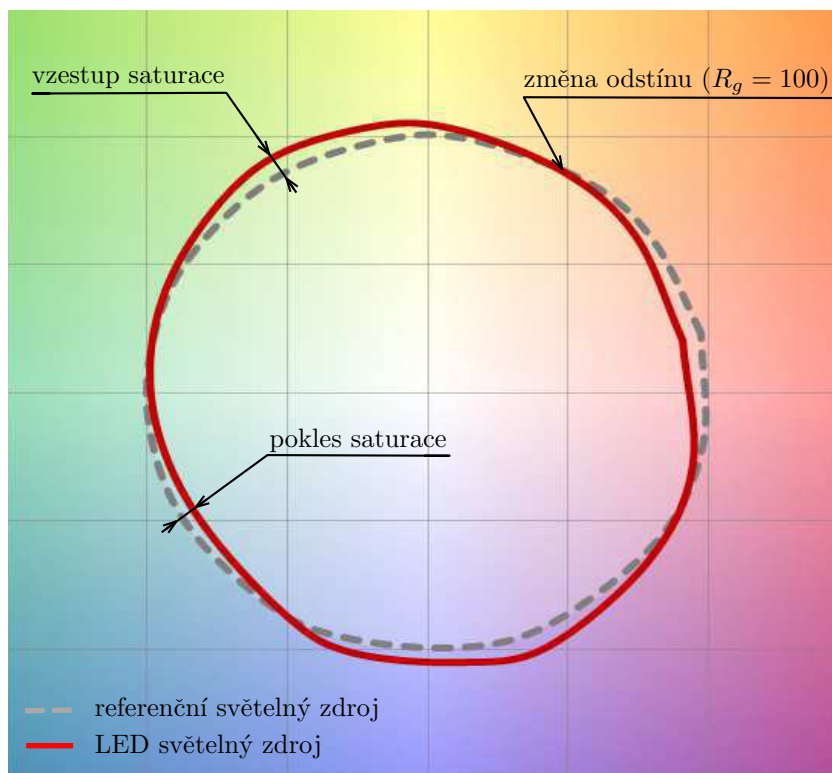
Obrázek 1.18: Barevný systém CIECAM02–UCS: Vlevo vyobrazeny oblasti hodnocení barevného vjemu. Vpravo 100 hodnotících vzorků testovaného LED zdroje (červené body tvaru čtverce) ve srovnání s referenčním zdrojem (modré kruhové body) v rovině $a'b'$ barevného systému [44]. Použité spektrum LED zdroje k nalezení v příloze A.

Systém využívá k hodnocení 99 barevných vzorků, které byly vybírány z databáze obsahující více jak 100 000 měřených objektů. Barevné vzorky pochází z reálných a existujících předmětů a nesou informaci o odraznosti povrchu. Soubor zahrnuje předměty jak se zrcadlovým, tak i s difúzním odrazem. Zvýšení počtu vzorků a jejich kvality poskytuje dostatečně statisticky reprezentativní jednotku pro hodnocení kvality vjemu barvy. Vzorky jsou navíc rozděleny do 7 kategorií [39]:

- příroda,
- barva kůže,
- textilie,
- barvy a nátěry,
- plasty,
- vytištěný materiál,
- barevné systémy (Munsell, Natural Color System [NCS], German Institute for Standardization [DIN] a další).

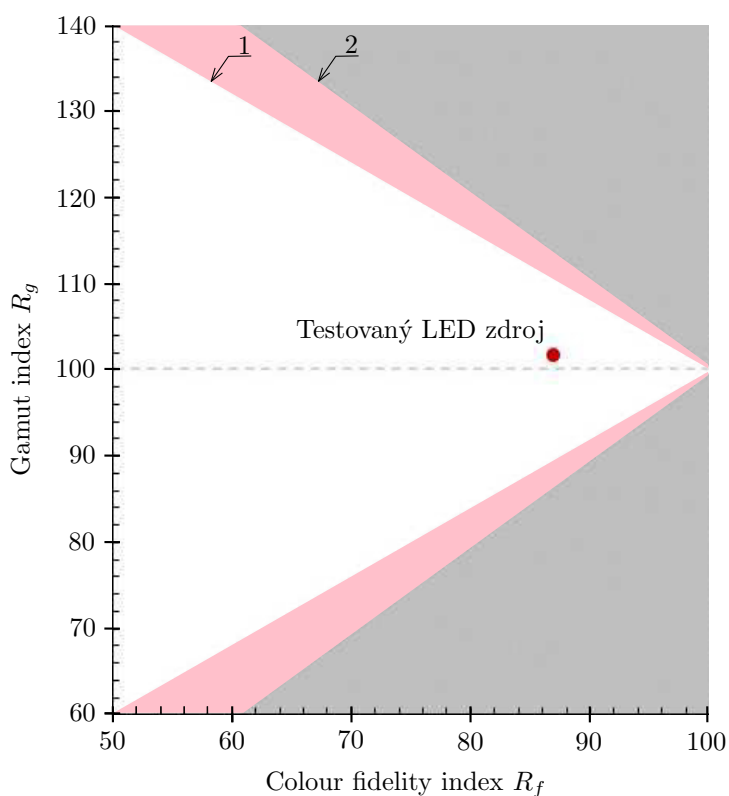
CIECAM2–UCS obsahuje několik velice užitečných nástrojů. Jedním z nich je Colour Vector Graphics, nástroj pro hodnocení saturace barevného odstínu, vyobrazen na obrázku 1.19. Jeho úkolem je srovnat testované světlo s referenčním a podat informaci, které barvy hodnoceného světla jsou více a které méně saturované oproti referenčnímu světlu [33, 42, 43].

$$T_{ch} = 3690 \text{ K}, R_a = 90,5, D_{uv} = -0,00541, R_f = 86,9, R_g = 101,8$$



Obrázek 1.19: Barevný systém CIECAM02–UCS: Colour Vector Graphics [44]. Použité spektrum LED zdroje k nalezení v příloze A.

Barevný systém umožňuje hodnotit sytost barvy i pomocí nástroje zvaného Gamut index R_g . Jedná se o další ukazatel kvality světla hodnotící vzrůst nebo pokles saturace. Vztah mezi pohodlím uživatele a indexem R_g je poměrně komplexní a individuální v závislosti na aplikaci. Neexistuje všeobecně doporučovaná hodnota indexu R_g . Světelné zdroje s obecně vyšší saturací jsou popsány jako příjemnější pro většinu pozorovatelů, avšak příliš saturovaný zdroj může působit na člověka negativně dle [33]. Hodnota R_g rovna 100 podává informaci, že světelný zdroj může produkovat sytosti barev osvětlovaných předmětů s velmi podobnou saturací jako je dosaženo při denním světle při cca 5500 K až 6500 K (standartizované světlo D55, D65). Pro hodnocení LED světelných zdrojů je přijatelné rozmezí hodnoty R_g od 60 do 140 při podmínce $R_f > 60$, vyšší hodnoty indexu vyjadřují vyšší saturaci a naopak [43]. Obrázek 1.20 znázorňuje vztah mezi indexy R_f a R_g . Na obrázku lze vidět, že CFI může nabývat hodnoty 100 pouze za podmínky nevyskytující se desaturace, tj. Gamut index bude roven také 100. Změna saturace barvy, tj. odchýlení R_g od hodnoty 100 vede k poklesu R_f . Na obrázku jsou dále patrné dvě barevně vyznačené plochy (šedá a růžová), které vyjadřují maximálně nebo minimálně dosažitelnou hodnotu R_g pro daný fidelity index [33].



- 1 - hranice dosažitelná pro zdroje ležící na Planckově křivce
- 2 - hranice dosažitelná pro zdroje používané v praxi

Obrázek 1.20: Barevný systém CIECAM02–UCS: Colour fidelity index R_f a Gamut index R_g . Šedou barvou vyznačená plocha, ve které neexistuje kombinace R_f a R_g pro bílý světelný zdroj. Světelné zdroje vyskytující se v této oblasti nemohou být považovány za bílý zdroj, jelikož jsou příliš vzdálené od Planckovy křivky. Navazující růžová plocha vyjadřuje nemožné kombinace pro zdroje používané v praxi ležící na Planckově křivce teplotních zářičů. Spektrum testovaného LED zdroje k nalezení v příloze A.

CFI je užitečný nástroj pro hodnocení kvality světla a vhodný doplněk k indexu podání barev R_a . V praxi se pro komerční aplikace a hodnocení produktů na trhu používá téměř vždy všeobecný index podání barev R_a hodnocený s osmi barevnými vzorky. Mnohdy se však může zdát nedostačující a pro přesnější informaci o kvalitě světla je vhodný výše zmíněný index R_f . Proto byly při návrhu svítidla používány obě metody hodnotící vjem barvy, nebyla však dostupná norma CIE 224:2017 k hodnocení indexu R_f a použití systému CIECAM02–UCS, ani její obdoba IES TM–30 [33]. Byl tedy použit bezplatný ColorCalculator 7.23 od firmy Osram Sylvania, který je volně dostupný na [45] v kombinaci s kalkulátorem [46]. Oba kalkulátory poskytují možnost výpočtu hodnot R_f a umožňují práci s některými nástroji tohoto barevného systému.

1.6.4 Index oslnění UGR (Unified glare rating)

Pokud se vyskytnou v zorném poli lidského oka příliš velké jasy nebo jejich rozdíly, které výrazně překračují mez adaptability zraku, vzniká oslnění. Tím je omezena činnost zrakového ústrojí, a tak narušena zraková pohoda. Podle psychofyziologických následků se oslnění dělí na [10, 11, 47]:

1. oslnění psychologické–pozorovatelné a rušivé,
2. oslnění fyziologické–omezující a oslepující.

Psychologické oslnění nevyvolává měřitelné změny zrakových funkcí. Naopak fyziologické oslnění omezující již zhoršuje činnost zraku a způsobuje snížení zrakových schopností. Snižuje se zraková ostrost a kontrastní citlivost. Fyziologické oslnění oslepující je však nejhorší. Znemožňuje činnost zraku vůbec, a to dokonce i nějakou dobu po zániku příčiny vzniku tohoto oslnění. Pro hodnocení oslnění se od roku 2004 v rámci evropských předpisů používá Sorensenův vzorec neboli index oslnění UGR. Tento vzorec a postup výpočtu je popsán v [10, 11, 34] pro zdroje oslnění, které jsou pozorovány pod prostorovým úhlem v rozmezí 0,1 sr až 0,0003 sr. Prostorový úhel 0,1 sr lze změřit například na vyzařovací ploše kruhového tvaru o průměru 107 cm ve vzdálenosti 3 m. Kruhová plocha s průměrem 20 cm odpovídá prostorovému úhlu 0,0003 sr ve vzdálenosti 10 m. Pro menší zdroje je činitel UGR příliš přesný, pro větší zdroje naopak přehnaně benevolentní [47]. Pro tyto případy osvětlení však vyvinula Mezinárodní komise pro osvětlování CIE jinou metodu výpočtu uvedenou v CIE 147:2002, kterou se však tato práce nebude zabývat. Výpočet indexu UGR zohledňuje:

- jas pozadí v místnosti,
- odraznost povrchů místnosti,
- velikost svítící plochy svítidla,
- svítivost svítidla ve směru k oku pozorovatele,
- činitel polohy podle Gutha pro každé svítidlo podle jeho odklonu od směru pohledu.

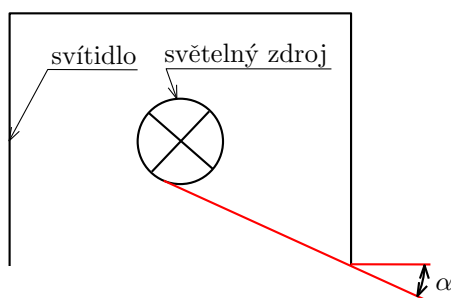
Index oslnění UGR je kritérium v praxi velmi často používané, proto je tato metoda hodnocení implementována v softwarech pro návrh osvětlení. Jedním z těchto softwarů je program Relux od švýcarské firmy Relux Informatik AG. Další hojně využívaný vizualizační světelnotechnický program je Dialux. ČSN EN 12464–1 stanovuje používat pro hodnocení indexu oslnění řadu UGR, viz tabulka 1.1. Tato řada určuje jaké rozdíly oslnění je pozorovatel schopen rozlišit. Například mezi hodnotu UGR 13 a 16 je z pohledu oslnění pozorovatelný rozdíl. Pokud by se ale srovnávaly hodnoty lišící se o méně jak 3 jednotky, změna již dle ČSN EN 12464–1 není pozorovatelem rozlišitelná. Pozorovatel není schopen rozlišit oslnění s indexem UGR=13 od hodnoty indexu UGR=14. Při návrhu osvětlovací soustavy nemá tedy obecně smysl dbát na desetinná místa výsledku. Podle Hopkinsova kritéria (obr. [11]) jsou osvětlovací soustavy s hodnotou UGR menší než 10 považovány za

neschopné generace nepříjemného oslnění. Ideální interiérové osvětlení prostoru z hlediska hodnocení oslnění je takové, které má hodnotu indexu UGR menší než 10.

Tabulka 1.1: ČSN EN 12464-1: Hopkinsonovo kritérium.

Stav oslnění	Hodnota UGR
Neznatelné	10
Právě neznatelné	13
Znatelné	16
Právě přijatelné	19
Nepřijatelné	22
Právě nepřijatelné	25
Nepříjemné	28

ČSN EN 12464–1 uvádí i nutnost clonění světelného zdroje, který je ve svítidle přímo viditelný. Úhel clonění je definován na obrázku 1.21 a jeho minimální hodnoty v tabulce 1.2. Požadavek normy se nevztahuje na svítidla nepřímá, s rozptylnými kryty (difuzory) a přímá instalovaná pod úrovní očí.



Obrázek 1.21: ČSN EN 12464–1: Úhel clonění α .

Tabulka 1.2: ČSN EN 12464–1: Minimální úhly clonění pro uvedené jasy světelných zdrojů.

Jas světelného zdroje ($kcd \cdot m^{-2}$)	Minimální úhel clonění $\alpha(^{\circ})$
20 až \downarrow 50	15
50 až \downarrow 500	20
\geq 500	30

Při návrhu samotného svítidla je kromě výše zmíněných informací vhodné brát ohled také na odraznost povrchů v osvětlované místnosti a vhodné směřování svítidel. Omezit oslnění lze volbou velké svítící plochy, vyšší odraznosti stropu a stěn a vhodnou volbou povrchů nábytku v místnosti. Odraznost stěn má však v běžné praxi zásadní vliv na index oslnění UGR oproti vlivu povrchu nábytku, který je téměř zanedbatelný [47]. V případě dostupnosti informací o adaptačním jasu v místnosti nebo možnosti jeho ovlivnění, je pro nízké oslnění vhodné získat, co nejvíce shodného jasu svítidla s adaptačním jasem okolí.

1.6.5 Činitel cirkadiánní účinnosti

Existuje mnoho veličin pro hodnocení cirkadiánních účinků světla na lidský organismus [32, 48, 49]. Jednou z nich je činitel cirkadiánní účinnosti $a_{v,mel}$, který byl poprvé definován Dietrichem Gallem [29]. Výpočet se provádí dle následujícího vzorce [32]

$$a_{v,mel} = \frac{\int_{380}^{780} X_{\lambda}(\lambda) \cdot s_{mel}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{380}^{780} X_{\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}, \quad (1.30)$$

kde:

- $a_{v,mel}$ je činitel cirkadiánní účinnosti,
- $X_{\lambda}(\lambda)$ je spektrální složení světelného zdroje [-],
- $s_{mel}(\lambda)$ je křivka citlivosti cirkadiánního systému (viz obrázek 1.13),
- $V(\lambda)$ je křivka spektrální citlivosti fotopického vidění normalizovaného pozorovatele CIE.

1.6.6 Metoda α -osvětlení

Další veličinou, která slouží k hodnocení účinků dopadajícího záření na sítnici je metoda α -osvětlení. Tato metoda vyjadřuje míru působení daného spektrálního složení světelného zdroje na jednotlivé druhy fotoreceptorů. Míra osvětlenosti daného fotoreceptorů se uvádí v jednotkách α -opic lux a počítá dle vzorce [14, 21, 49]

$$E_{\alpha} = K_N \int E_{e,\lambda} N_{\alpha}(\lambda) d\lambda, \quad (1.31)$$

kde:

- E_{α} je osvětlení daného typu fotoreceptoru,
- K_N je konstanta $K_N = 72\,983,25 \alpha\text{-lm/W}$ vypočtená z rovnice ??,
- $E_{e,\lambda}$ celkové ozáření [W/m^2],
- $N_{\alpha}(\lambda)$ je spektrální citlivosti daného fotoreceptoru (viz obrázek 1.7).

$$K_N = \int K(\lambda) d\lambda. \quad (1.32)$$

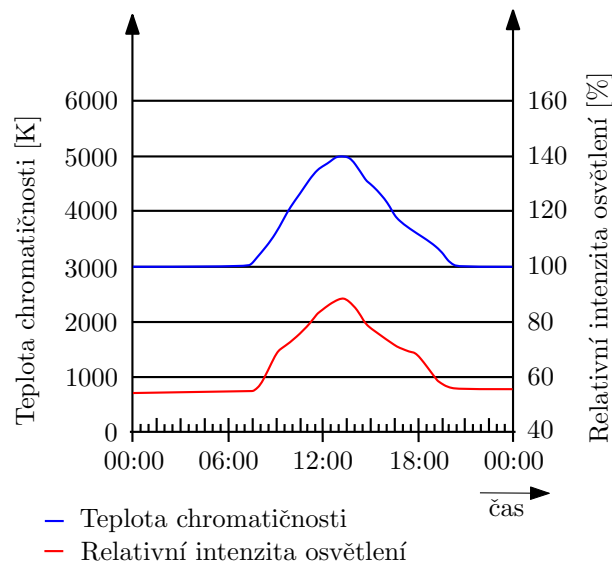
Z výpočtu konstanty K_N (rovnice 1.32) je zřejmé, že výsledné hodnoty osvětlení E_{α} jsou vztaženy ke světelné fotopické účinnosti $K(\lambda)$, tedy i ke křivce $V(\lambda)$. Hodnota K_N svou velikost s typem fotoreceptoru nemění. Pro výpočty hodnot α -osvětlení ze změřeného spektrálního složení světla zdroje je v této práci použit volně dostupný kalkulátor z <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0166223613001975> [13, 14, 21, 49].

1.7 Interiérové svítidlo v trendu HCL

Úkolem podkapitoly je vytvořit čtenáři představu o svítidle v trendu HCL. Jaké funkce by mělo interiérové svítidlo plnit a co vše uživateli umožňovat. Při tvorbě návrhu svítidla s ohledem na nevizuální působení světla na lidský organismus jsou důležité hlavně tyto parametry [4]:

- spektrální složení zdroje světla,
- intenzita osvětlení svítidla,
- aktuální denní doba,
- světelná distribuce svítidla.

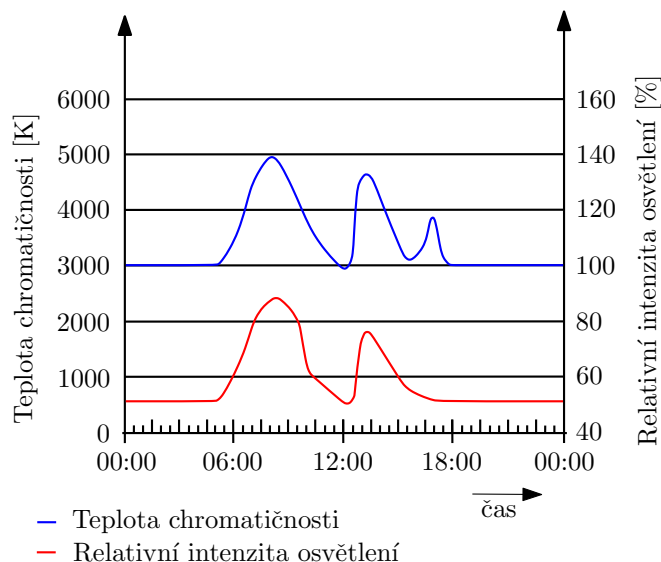
Osvětlovací soustava, u které lze regulovat intenzitu osvětlení a teplotu chromatičnosti světelného zdroje se nazývá dynamická. Je hlavní a nezbytnou funkcí, kterou musí svítidlo v trendu Human Centric Lighting obsahovat. Změna spektrálního složení zdroje a intenzity vyzařovaného světla by měla být proveditelná plynule v čase. V části 1.6.1 bylo uvedeno jako nejlepší možné světlo denní, tedy vyzařované Sluncem. Cílem by měla být snaha, spektrálně napodobit denní světlo. Avšak pokud člověk vstoupí do místnosti s intenzitou osvětlení 20 000 lx, bude se cítit velmi nepohodlně a jeho vizuální vjem bude narušen oslněním [50]. Naopak při pobytu na denním světle o stejné intenzitě bude vjem přirozený a příjemný. Je nutno proto pohlížet na tento ideální cíl s určitým odstupem. Jedním z dokumentů, který se tímto tématem zabývá je norma DIN SPEC 67600: Biologically effective illumination–Design guidelines, vydaná v dubnu roku 2013, která podává informace potřebné při návrhu svítidla v trendu HCL. Doporučuje hodnoty teploty chromatičnosti a intenzity vnitřního dynamického osvětlení dle typu prostoru a vykonávané činnosti. Například pro mateřské školy jsou doporučovány dva způsoby řízení dynamického osvětlení. První je znázorněn na obrázku 1.22 a jeho cílem je napodobit změnu denního světla během 24 hodin. Průběh změřených parametrů denního světla měnící se během dne je pro porovnání na obrázku 1.14. Intenzita osvětlení i teplota chromatičnosti umělého osvětlení dle obrázku 1.22 po probuzení rovnoměrně stoupá k maximu poledních hodnot. Po poledni hodnoty postupně klesají k minimu cca mezi 20:00 a 21:00 hodinou, kdy nabývá intenzita i teplota chromatičnosti hladin, které se udržují po celou noc a nezpůsobují žádnou stimulaci cirkadiánního systému.



Obrázek 1.22: DIN SPEC 67600: Řízení vnitřního dynamického osvětlení během jednoho 24 hodinového cyklu. Cílem je napodobit změnu denního světla. Převzato z [51].

Druhý způsob řízení dynamického osvětlení zohledňuje běžnou aktivitu člověka během dne a je na obrázku 1.23. Bere v úvahu například únavu lidského organismu, která většinou nastává po obědě. Aby se člověk v této době mohl uvolnit, relaxovat a udělat si pauzu, sníží se hodnoty in-

tenzity i teploty chromatičnosti. Po pauze následuje opět zvýšení hodnot za účelem povzbuzení aktivity a udržení bdělosti organismu. Často se lze setkat s tímto způsobem řízení vnitřního osvětlení v budovách s pevně nastaveným a pravidelně se opakujícím režimem prováděných činností, jako například v kancelářských prostorech nebo ve vzdělávacích zařízeních. Při řízení dynamické osvětlovací soustavy je vhodné vyhnout se náhlým změnám ve světelné intenzitě a teplotě chromatičnosti, protože rychlé změny mohou mít naopak negativní účinky na cirkadiánní systém člověka [51]. Pokles a vzestup parametrů osvětlovací soustavy by měl být dodržen dle obrázků 1.22 a 1.23.



Obrázek 1.23: DIN SPEC 67600: Řízení vnitřního dynamického osvětlení během jednoho 24 hodinového cyklu. Přizůsobeno aktivitě člověka během dne. Převzato z [51].

Oba způsoby řízení dynamického osvětlení jsou na obrázcích 1.22 a 1.23 uvedeny pro 25–ti letého pozorovatele. Pokud by bylo úkolem navrhnout dynamické osvětlení prostoru s pobytem osob vyššího věku, je nutné vynásobit hodnoty intenzity osvětlení koeficientem 1,3 pro 50–ti letého a 2,2 pro 75–ti letého člověka. Důvodem je snižování propustnosti zornice lidského oka s rostoucím věkem. Bez ohledu na místnost a její využití, norma DIN SPEC 67600 obecně doporučuje během dne a přednostně ráno, vertikální osvětlenost v úrovni oka pozorovatele více jak 250 lx při teplotě chromatičnosti 8000 K. Naopak v noci by neměla hodnota vertikální osvětlenosti převýšit 50 lx a při teplotě chromatičnosti 2700 K.

Interiérové svítidlo se zaměřením na člověka by mělo vyčnívat mezi běžnými konvenčními svítidly. Mělo by se jednat o moderní svítidlo, které osloví uživatele svou funkčností a svými možnostmi. Uživateli produktu by mělo být umožněno dynamické řízení světelného zdroje například přes aplikaci ve smartphonu, počítači nebo ovládacím panelem umístěným na zdi osvětlované místnosti. Uživatelské prostředí pro ovládání by mělo být jednoduché, obsahovat jak automatický režim řízení, tak možnost libovolného nastavení dle aktuální vykonávané činnosti nebo dle pocitů uživatele. Vhodným příkladem takového prostředí je software f.lux, který je pro osobní použití bezplatný a dostupný na [52]. Účelem softwaru je regulace parametrů monitoru elektronického zařízení, ať už se jedná o smartphonu, tablet, notebook nebo stolní počítač. Vstupem pro software je pouze přibližná poloha uživatele, dle které si zjistí aktuální denní stav, dobu východu či západu Slunce a podle těchto informací řídí parametry monitoru elektronického zařízení s ohledem na působení světla na člověka a HCL. Je tak zamezeno osvětlování sítnice světlem způsobujícím

cirkadiánní aktivitu před spánkem (modrým světlem) a nedochází k potlačení hladiny hormonu melatoninu v těle. Použití softwaru by mělo mít příznivé účinky na lidský organismus, jeho fyziologický a psychologický stav a zároveň zkvalitňovat spánek [52].

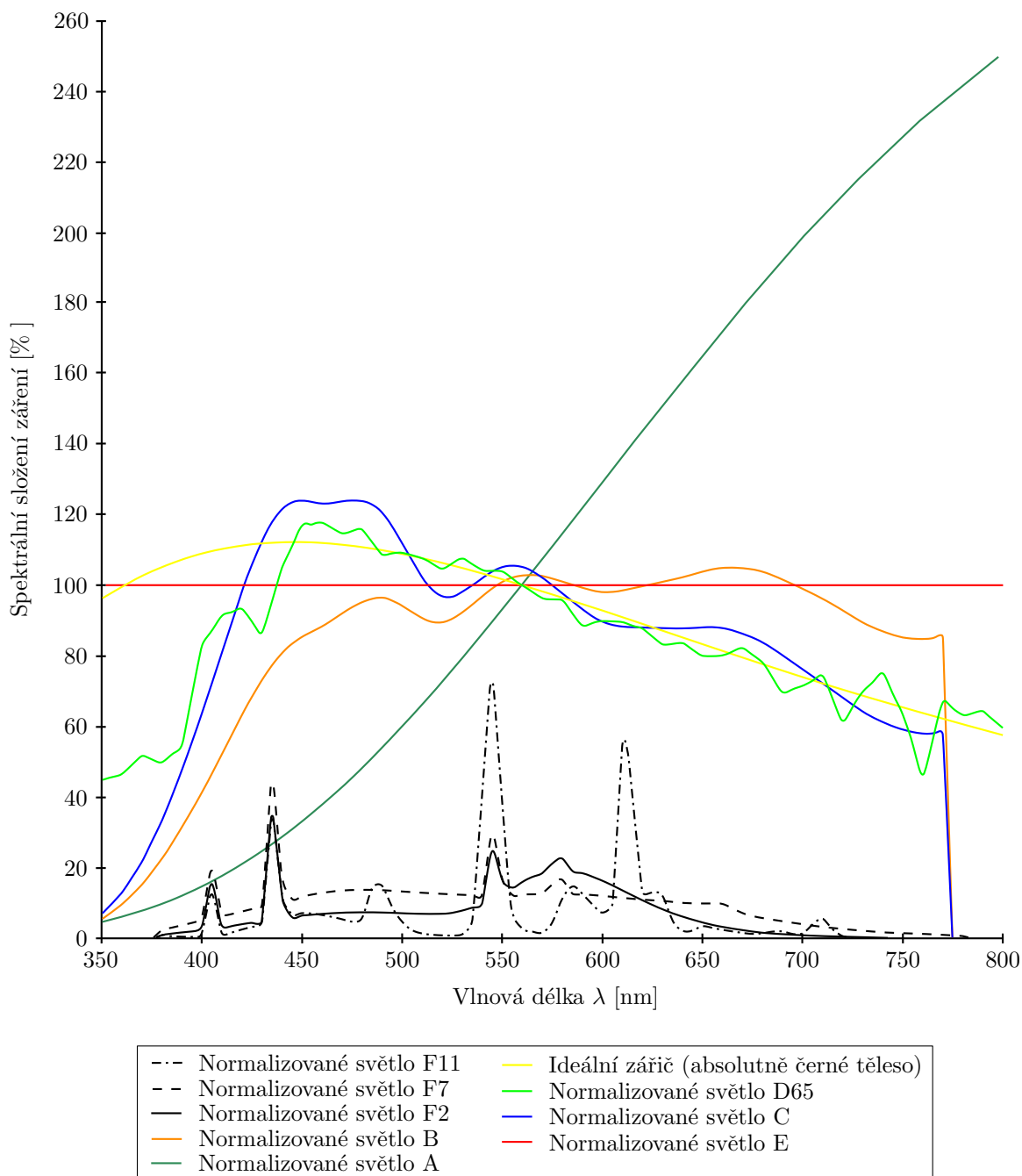
Doplňkem dynamické osvětlovací soustavy se zaměřením na HCL může být i sensor snímající aktuální parametry venkovní oblohy. Dle dat pocházejících ze sensoru pak upravuje vnitřní osvětlovací soustava světelné prostředí tak, aby bylo co nejvíce podobné venkovnímu. V osvětlovaném prostoru se mohou nacházet okna, průhledy, světlovody nebo jakýkoliv jiný příspěvek denního světla. Zakomponování několika sensorů do místnosti vnitřního osvětlení může zajistit snímání tohoto denního příspěvku a regulaci celého osvětlovacího systému s ohledem na aktuální denní světlo nacházející se v místnosti.

Podstatou dynamické osvětlovací soustavy zaměřené na HCL není pouze vytvořit vhodný nevizuální vjem změnou parametrů svítidla v čase. Při návrhu by měl být brán ohled také na vizuální vnímání světla a vše s ním spojené. Mělo by se zamezit například oslnění pozorovatele a dodržet rovnoměrné rozložení světla v rovině vykonávaného úkonu. Ideální osvětlovací soustava vytváří v ten samý okamžik vhodné podmínky pro vizuální i nevizuální vnímání světla [51].

Nevýhodou bývá u HCL osvětlení obecně vyšší příkon a spotřeba, v [51] uvádí 3 krát vyšší instalovaný příkon a o 25% vyšší spotřeba oproti konvenčnímu osvětlení.

1.8 Normalizované druhy světla

Normalizované druhy světla se obvykle používají jako referenční srovnávací světlo při návrhu světelného zdroje, kdy je cílem dosáhnout co největší podobnosti těmto normovaným spektrálním složením světla. Mezinárodní komise pro osvětlování CIE stanovila druhy světel, které jsou zobrazeny na obrázku 1.24.



Obrázek 1.24: Normalizované druhy světel [10].

1.9 Tepelný management LED

Protože jsou diody teplotou silně ovlivňovány, má jejich tepelný management významnou roli při návrhu zdroje světla. Na úrovni samotné LED diody je předurčen jejím designem, tedy tím kdo a jak ji vyrobil [53]. Při návrhu tepelného managementu je vhodné uvažovat, zda použít jednu LED s vysokým výkonem, nebo použít více slabších. Jedna LED bude kompaktnější, s více menšími diodami bude zase rovnoměrnější rozložení tepla při vývodu na DPS. Existují také moduly, které kombinují oboje a v jednom balení nabízejí více diod při zachování malých rozměrů. Jednou z nejdůležitějších částí tepelného managementu je tepelný odpor R , který je důležité udržovat na co nejnižších hodnotách. Při spojení dvou těles vznikají v místě styku díky nedokonalému povrchu mezery, které se projevují nedokonalým přenosem tepla. Naneseme-li mezi spojované plochy malou vrstvu výplňového materiálu s dostatečnou tepelnou vodivostí, přenos tepla se výrazně vylepší. Tepelný odpor tohoto spojení je pak přímo úměrný tloušťce spojovací vrstvy, nepřímo úměrný ploše a tepelné vodivosti výplňového materiálu. Vztah pro výpočet tepelného odporu, který lze použít pro různé materiály je následující [53–55]

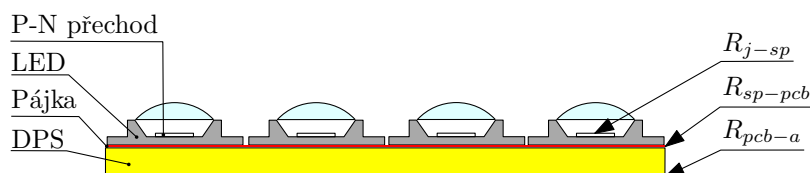
$$R_i = \frac{L}{\lambda \cdot S}, \quad (1.33)$$

kde:

- R_i je tepelný odpor [$K \cdot W^{-1}$],
- L je délka materiálu ve směru šíření [m],
- S je plocha, kterou teplo prostupuje [m^2]
- λ je tepelná vodivost materiálu [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$].

Základní rozdělení tepelného systému výkonné LED diody má několik úrovní. Pro účely této práce jsou uvažovány tři přechody (tepelné odpory), které jsou zobrazeny v tepelném schématu na obrázku 1.25. Prvním je tepelný odpor mezi P–N přechodem a pájkou značený R_{j-sp} (z anglického junction–solder point). Pájka (také dielektrikum) je elektroizolační nosná podložka mezi elektronickými součástkami (například LED diodami) a DPS sloužící ke zhotovení vodivého motivu. Hodnota R_{sp-pcb} vyjadřuje tepelný odpor mezi pájkou a deskou plošných spojů (solder point–printed circuit board resistance). Tepelný odpor mezi deskou plošných spojů a okolím vyjadřuje veličina R_{pcb-a} (printed circuit board resistance–ambient). Celkový tepelný odpor lze pak spočítat jako součet dílčích odporů [53, 54]

$$R_{j-a} = R_{j-sp} + R_{sp-pcb} + R_{pcb-a}. \quad (1.34)$$



Obrázek 1.25: Tepelné schéma návrhu DPS: Veličiny R_{j-sp} , R_{sp-pcb} , R_{pcb-a} vyjadřují tepelný odpor jednotlivých přechodů mezi LED, DPS a okolím. Převzato a upraveno z [55].

V tabulkách 2.1 a 2.2 vždy čtvrtý sloupec od konce uvádí tepelný odpor R_{j-sp} uváděný přímo výrobcem, který slouží jako kritérium k hodnocení kvality tepelného managementu každé LED.

Jeho hodnota se může měnit v závislosti na materiálu čipu, rozměrech a vlastnostech prostředí (proudění vzduchu a chlazení). Výpočet se provádí dle [53]

$$R_{j-sp} = \frac{\Delta T}{P_t} = \frac{T_j - T_a}{P_t}, \quad \left[\frac{K}{W} \right] \quad (1.35)$$

kde:

- T_j je teplota na P–N přechodu (junction temperature) [K],
- T_a je teplota okolí (ambient temperature) [K],
- P_t je tepelný tok [W]
- R_{j-sp} je tepelný odpor mezi P–N přechodem a pájkou [K/W⁻¹].

Tepelný tok P_t je pro zjednodušení počítán jako 75 % z celkového příkonu LED. Zbýlých 25 % příkonu se přemění na energii v podobě světelného záření. Vzorce 1.34 a 1.35 jsou pouze pro základní výpočet přestupu tepla. Ten by měl být v této práci dostačující pro získání přibližné informace, která LED světelná dioda má lepší tepelný management. Samotný tepelný management LED je ale mnohem komplikovanějším a rozsáhlejším oborem, než bylo v této kapitole popsáno.

Obsah první kapitoly dokazuje, že má smysl zabývat se světlem, kterému se každodenně vystavujeme jak z vědeckého hlediska, tak v roli běžného uživatele vnitřní osvětlovací soustavy. Dnešní doba nedovolí člověku vyhnout se působení umělého světla a jeho značnému vlivu na lidský organismus. Proto by měl být při návrhu vnitřní osvětlovací soustavy kladen důraz i na nevizuální účinky světla a jejich dopad na lidské zdraví. Dosáhnout takového cíle v běžné praxi není jednoduchým úkolem. Prvním krokem je obvykle vytvořit poptávku po svítidlech v trendu Human Centric Lighting, aby poskytovatelé svítidel uvedli na trh nabídku těchto produktů. Pokud pak bude ze strany uživatele osvětlovací soustavy kladen důraz na tyto nevizuální vlivy světla a jeho kvalitu, budou i poskytovatelé umělého osvětlení nuceni se tématem Human Centric Lighting více zabývat.

Na konci první kapitoly stojí za to upozornit čtenáře, že současný stav poznání je velmi daleko od kompletního pochopení vlivu světla na cirkadiánní rytmus a lidský organismus. Avšak to, že modré světlo má vliv na člověka je jednoznačně v této kapitole dokázáno. Objev ipRGCs odstartoval řadu nových terapeutických a léčebných metod. Používá se v medicíně například k léčbě zimní deprese neboli sezónní afektivní poruše (SAD), pásmové nemoci (jetlag) a má anti-depresivní účinky při osvětlenosti vyšší jak 2500 lx [8, 13]. Dalším využitím nachází obor Human Centric Lighting například při práci na nočních směnách nebo delším pobytů osob ve vesmíru. Je velmi pravděpodobné, že množství aplikací, kde je možné uplatnit tento obor světelné techniky ještě dlouhou dobu poroste. Touto stranou končí teoretický úvod diplomové práce, ve kterém byla uvedena většina informací a veličin potřebných pro návrh a hodnocení svítidla v trendu HCL. Následující části práce se budou o znalosti z této kapitoly opírat a často se k ní vracet.

2 NÁVRH SVÍTIDLA S OHLEDEM NA HCL A FINÁLNÍ INSTALACI SVÍTIDEL

Hlavní částí diplomové práce je návrh svítidla s ohledem na vliv světla na člověka. Do návrhu by tak měly být zakomponovány poznatky z první kapitoly a svítidlo by mělo být navrženo s důrazem na Human Centric Lightig. Celá tato kapitola bude uvedena návrhem světelného zdroje svítidla, kdy se od promyšlené volby LED diody čtenář dosatne až k dynamickému řízení zdroje svítidla. Na kvalitě simulace světelného zdroje totiž značně závisí kvalita návrhu celého optického systému. Pro přesnější vstupní data do simulace bude proto provedeno reálné měření spektrálního složení světelného zdroje. Ve stěžejní části práce, optickém návrhu svítidla, bude následně popsán vývoj jednotlivých částí svítidla s představením finálního návrhu na závěr kapitoly. Na samotném začátku návrhu svítidla je však nejdůležitějším bodem stanovit si cíle a požadavky kladené na výsledný produkt.

2.1 Definice požadavků na návrh a jeho cíle

V podkapitolách 1.6 a 1.7 byly popsány základní kritéria k hodnocení kvality světla a návrhu svítidla. V následujícím textu budou tyto teoretické základy prakticky použity k návrhu svítidla. Úkolem je stručně shrnout a nadefinovat cíle a požadavky, které by mělo svítidlo v trendu HCL plnit:

1. Spektrální složení světla vyzařovaného svítidlem by mělo být co nejvíce podobné dennímu světlu s ohledem na fyzikální omezení určené polovodičovou součástí emitující světlo, neboli LED diodou (část 1.6.1).
2. Hodnoty teploty chromatičnosti svítidla a intenzity osvětlení by měly být proměnné v čase a odpovídat grafu na obrázku 2.2 (podkap. 1.7).
3. Odchylka D_{uv} by se měla vždy pohybovat v rozmezí od $-0,006$ do $+0,006$ (část 1.6.2).
4. Hodnota odchylky Δ_{uv} by se měla vždy nacházet uvnitř rozsahu $\pm 0,0054$ (část 1.6.2).
5. Vjem osvětlovaných předmětů lidským okem by měl co nejvíce napodobovat vjem, který tvoří denní světlo (Slunce). Tedy hodnoty indexů R_a, R_f, R_g by se měly blížit co nejvíce hodnotě rovné 100 s uvážením, že tato hodnota nemusí nutně znamenat nejlepší výsledek a ideální napodobení denního světla (část 1.6.3).
6. Velikost saturace a desaturace zobrazované nástrojem Colour Vector Graphics by měla být co nejmenší (část 1.6.3).
7. Osvětlovací soustava tvořená svítidly navrženými v této práci by neměla způsobovat oslnění, tedy hodnota indexu UGR by měla co nejvíce klesat k číslu 10, kdy už nedochází k pozorovatelnému oslnění (část 1.6.4).
8. V průběhu návrhu by měl být kladen důraz převážně na kvalitu vyzařovaného světla, jeho světelnou distribuci a dynamické řízení spektrálního složení. Účinnost a cena jsou druhořadými požadavky.

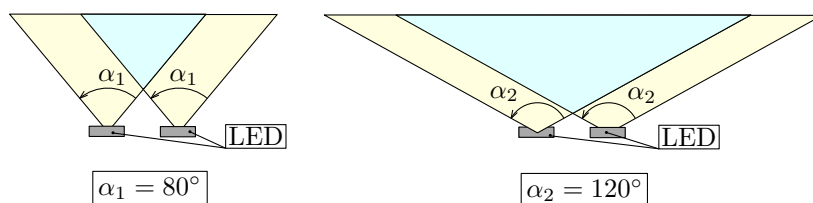
2.2 Světelný zdroj

Nedílnou součástí optického návrhu svítidla je návrh a definice světelného zdroje. Aktuálně nej-používanějšími světelnými zdroji v oblasti světelné techniky a vnitřních osvětlovacích soustav jsou polovodičové součástky obsahující P–N přechod nazývané LED diody (z anglického Light–Emitting

Diode). Definice světelného zdroje pro svítidlo v trendu HCL bude v této práci zužena pouze na výběr LED, které jsou v dnešní době standardním světelným zdrojem vnitřních osvětlovacích soustav. Porovnání LED s ostatními světelnými zdroji je zpracováno v nespočetném množství závěrečných prací jako například v [57, 58], kde je možné dohledat veškeré výhody těchto zdrojů emitujících viditelnou část elektromagnetického záření.

2.2.1 Výběr LED světelné diody

Dnešní trh nabízí velké množství poskytovatelů těchto polovodičových elektronických součástek. Pro zjednodušení byly v této práci vybírány LED světelné zdroje od dvou společností, které patří mezi lídry ve výrobě polovodičových LED diod emitujících světlo. Jedná se o firmu OSRAM Opto Semiconductors se sídlem v Německu založenou roku 1919 v Berlíně a amerického světového výrobce světelných diod Cree Inc. Výběr byl prováděn z aktuální nabídky produktů na webových stránkách společností s filtrováním výsledků. Prvním filtrem bylo omezení výběru pouze na LED diody s vyzařovacím úhlem minimálně 100° z důvodu dosažení více homogenního barevného výstupu. Příklad lze vidět na obrázku 2.1. Čím více se světelné kužely jednotlivých LED zdrojů překrývají, tím je výstup světla barevně více homogenního. Více o barevné homogenitě světla týkající se optického návrhu svítidla v části 2.3.3.



Obrázek 2.1: Vyzařovací úhel LED: U dvojice světelných diod s úhlem vyzařování 120° dochází k mnohem většímu překryvu světelných kuželů (vyznačeno modrou barvou) v porovnání s dvojicí diod s vyzařovacím úhlem 80° . Větší úhel vyzařování tedy znamená lepší barevnou homogenitu světla vystupujícího ze světelného zdroje.

Výběr kombinace barev světelných diod je důležitou součástí návrhu zdroje svítidla v trendu HCL. Cílem je získat takový světelný zdroj, který umožní měnit své spektrální složení tak, aby bylo co nejvíce podobné dennímu světlu. Prvním předpokladem k dosažení tohoto cíle je vybrat takové LED, aby převažující část světelného zdroje byla tvořena bílým světlem, tedy bílými diodami. Dle požadavků návrhu a normy DIN SPEC 67600 (podkap. 1.7) je doporučeno dynamicky měnit teplotu chromatičnosti světla od 3000 K do 5000 K. Tohoto cíle lze nejlépe dosáhnout volbou kombinace bílé LED o teplotě chromatičnosti 4000 K s barevnými diodami. Díky této kombinaci bude pak dosažen vysoký barevný gamut světelného zdroje, který vyjadřuje rozsah všech barev, které je zařízení schopno vytvořit. Druhý filtr tedy omezil výběr pouze těch LED, které nabízejí R, G, B, W (červenou, zelenou, modrou a bílou) variantu vyzařující konkrétní část viditelného elektromagnetického záření emitovaného diodou.

Díky těmto filtrům bylo vybíráno pouze ze tří typů LED od společnosti OSRAM, viz tabulka 2.1 a čtyř druhů ze skupiny vysokovýkonných světelných diod Cree XLamp High-Power LEDs, viz tabulka 2.2. Obě tabulky byly vypracovány pro porovnání parametrů těchto 7 druhů LED. Obsahují základní informace jako označení produktu, barvu vyzařovaného světla, velikost diody nebo hodnotu vlnové délky, na které vyzáří P-N přechod nejvíce energie. V tabulkách 2.1 a 2.2 jsou

zobrazeny také hodnoty potřebné pro výpočet světelného toku LED diody s ohledem na dopředný proud (I_d) a teplotu na čipu (T_j), který se počítá za pomoci informací dostupných na stránkách výrobce LED (data sheet). Vstupem do výpočtu je hodnota minimálního světelného toku $\Phi_{e,min}$ získaná přímo z katalogu lišící se dle typu použitého BINu. Jelikož je výroba LED diod technologicky náročný a sofistikovaný proces, při kterém vždy vznikne v procesu výroby na základě statistického rozložení dle Gaussovy křivky velké množství diod s různými vlastnostmi, třídí se vyrobené diody podle svých dominantních vlastností do skupin nazývaných BINy. LED BIN, ve dle označení typu LED, upřesňuje jejich konkrétní vlastnosti. Kompletní znění BINu se skládá z informací o:

- svítivosti – svítivostní BIN (Luminous Intensity Bin Code),
- barevné teplotě LED – BIN barevné teploty (Chromaticity Coordinates Bin Code),
- dopředném napětí – napěťový BIN (Forward Voltage Bin Code).

Pro získání přibližného množství energie, které LED dioda vyzáří je nutné vynásobit hodnotu min. světelného toku $\Phi_{e,min}$ (příslušící konkrétnímu BINu a udávanou výrobcem v jednotkách lm nebo W) koeficientem k_1 zohledňujícím teplotu P–N přechodu T_j [$^{\circ}C$] a koeficientem k_2 dopředného proudu I_d [A]. Hodnota T_j je označení pro teplotu polovodičového P–N přechodu v místě kontaktování vnitřního přívodu čipu v LED diodě. Dopředný proud I_d vyjadřuje elektrický stejnosměrný proud, který prochází P–N přechodem v propustném směru. Například pro LED OSRAM Oslon SSL 150 s označením GR CSHPM1.23 je dle tabulky 2.1 výpočet vyzářeného světelného toku diodou následující

$$\Phi_e = \Phi_{e,min} \cdot k_1 \cdot k_2 = 73,5 \cdot 0,54 \cdot 2,6 = 103,2 \text{ lm}.$$

Dále byly používány při výběru světelného zdroje kritéria jako index podání barev R_a , cena při koupi 1 ks LED a nebyl opomenut ani tepelný management, který byl v prvotní fázi hodnocen pouze na základě hodnoty tepelného odporu R_{j-sp} .

Tabulka 2.1: Porovnání parametrů LED diod od společnosti Osram Opto Semiconductors [59].

Typ	Označení ^a	Barva ^b	λ [nm], T_{CH} [K]	Velikost diody [mm x mm]	BIN ^c	Φ_e, min [lm], [mW]	k_1 (při $T_j =$ 100°C) [-]	k_2 (při $I_d =$ 1 A) [-]	Světelný tok Φ_e [lm], [mW]	R_j-sp [K/W ⁻¹]	Vyzařovací úhel světelného zdroje [°]	$R_{a,min}$ [-]	Cena při koupi 1ks [Kč/ks] ^d
O. Ostar Projection Compact	LE R Q8WP	R	625,0 [nm]		LB	160,0	0,43	0,75	51,6	3,6	120	-	-
	LE T Q8WP	G	530,0 [nm]		NA	317,0	0,85	0,70	188,6	3,6	120	-	-
	LE B Q8WP	B	459,0 [nm]	3,8 x 3,8	6B	2125,0 ^e	0,95	0,75	1514,1 ^e	3,6	120	-	-
	LE UW Q8WP	CW	6500 [K]		PA	505,0	0,88	0,75	333,3	3,6	120	-	-
OSRAM Oslon SSL 150	GR CSHPM1.23	R	634,0 [nm]		KP	73,5	0,54	2,60	103,2	2,5	150	-	48,0
	GA CSHPM1.23	A	625,0 [nm]		KT	100,6	0,60	2,60	156,9	5,3	150	-	35,1
	GT CSHPM1.13	TG	521,0 [nm]		LS	147,0	0,81	2,15	256,0	6,4	150	-	49,4
	GB CSHPM1.13	B	465,0 [nm]	3,1 x 3,1	HY	36,0	1,13	2,10	85,4	4,6	150	-	41,7
	GW CSHPM1.PM	W	4000 [K]		LR	130,0	0,96	2,30	287,0	3,7	150	70	48,1
	GW CSHPM1.CM	W	4000 [K]		KU	104,2	0,96	2,35	235,1	4,2	150	90	48,1
OSRAM Oslon Signal	LJ CKBP	R	625,0 [nm]		JZ	66,0	0,45	2,50	74,3	9,6	125	-	39,2
	LT CQBP	TG	528,0 [nm]		LX	121,0	0,88	2,00	213,0	9,6	130	-	45,3
	LB CRBP	B	475,0 [nm]	3 x 3	HZ	33,0	1,15	2,10	79,7	9,6	120	-	43,3
	LV CQBP	V	505,0 [nm]		JZ	61,0	0,89	2,10	114,0	9,6	130	-	64,5
	LW CRBP	W	5200 [K]		LY	140,0	0,87	2,25	274,1	9,6	120	81 ^f	51,0

^aHodnoty v tabulce odpovídají vždy množství 1 ks LED diody.

^bBarva vyzářovaného světla LED diodou: R (red), A(amber)⇒červená; TG (true green), G(green)⇒zelená; B (blue), V(verde), RB(royal blue)⇒modrá; CW(cool white), NW(neutral white), WW (warmwhite)⇒bílá

^cByly vybrány převážně BINy se středním a vyšším světelným tokem

^dCeny převzaty z www.cz.mouser.com, www.digikay.be, www.cz.rs-online.com vždy při odběru množství v počtu 1 ks. Cena odpovídá přibližnému BINU a minimálnímu světelnému toku uvedenému v této tabulce. Zpracováno v dubnu 2018.

^eHodnota je uvedena v jednotkách [mW].

^fHodnota indexu podání barev R_a dopočítána ze spektrálního složení udávaného výrobcem na webových stránkách

Tabulka 2.2: Porovnání parametrů LED diod od společnosti Cree [60].

Označení	Barva	λ T_{CH} [K]	λ [nm], T_{CH} [K]	Velikost diody [mm x mm]	BIN	Φ_e, min [lm], [mW]	k_1 (při $T_j =$ 100°C) [-]	k_2 (při $I_d = 1\text{ A}$) [-]	Světelný tok Φ_e [lm], [mW]	R_{j-sp} [K/W ⁻¹]	Výzařovací úhel světelného zdroje [°]	$R_{a,min}$ [-]	Cena při koupi 1ks [Kč/ks]
XQ E HI	R	625,0 [nm]	625,0 [nm]		N2	51,7	0,56	2,60	75,3	5,0	125	-	-
	G	527,5 [nm]	527,5 [nm]		Q3	94,0	0,80	1,85	139,1	9,0	130	-	-
	RB	457,5 [nm]	457,5 [nm]		N	550,0 ^e	0,89	2,40	1174,8 ^e	6,0	130	-	-
	WW	3000 [K]	3000 [K]	1,6 x 1,6	Q5	107,0	0,94	2,20	221,3	6,0	120	70	24,8
	CW	6500 [K]	6500 [K]		R3	122,0	0,94	2,20	252,3	6,0	120	90	27,4
	NW	4750 [K]	4750 [K]		R2	114,0	0,94	2,20	235,8	6,0	120	95	23,5
XQ E HD	R	625,0 [nm]	625,0 [nm]		P2/P3	70,0	0,56	2,60	101,9	5,0	130	-	28,2
	G	527,5 [nm]	527,5 [nm]		Q5	107,0	0,81	1,82	157,7	9,0	125	-	30,2
	RB	457,5 [nm]	457,5 [nm]		P	575,0 ^e	0,85	2,35	1148,6 ^e	6,0	125	-	34,8
	WW	3000 [K]	3000 [K]	1,6 x 1,6	P4	80,6	0,96	2,20	170,2	6,0	110	70	27,4
	CW	6500 [K]	6500 [K]		R3	122,0	0,96	2,20	257,7	6,0	110	90	24,4
	NW	4750 [K]	4750 [K]		R2	114,0	0,96	2,20	240,8	6,0	110	75	22,3
XB D	R	625,0 [nm]	625,0 [nm]		N4	62,0	0,52	2,60	83,8	5,0	140	-	28,0
	G	527,5 [nm]	527,5 [nm]		Q3	94,0	0,94	1,70	150,2	11,0	135	-	21,0
	B	475,0 [nm]	475,0 [nm]	2,45 x 2,45	K3	35,2	0,92	2,00	64,8	6,5	135	-	21,0
	NW	4400 [K]	4400 [K]		Q3	114,0	0,96	2,25	246,2	6,5	115	80	16,4
XP E2	R	625,0	625,0 [nm]		P3	74,0	0,58	2,55	109,4	5,0	130	-	31,0
	G	525,0 [nm]	525,0 [nm]		R2	114,0	0,85	1,90	184,1	15,0	135	-	33,2
	B	475,0 [nm]	475,0 [nm]	3,45 x 3,45	K3	35,2	0,96	2,15	72,7	9,0	135	-	30,0
	WW	2200 [K]	2200 [K]		P2	67,2	0,95	2,20	140,4	9,0	110	80	28,7
	CW	6500 [K]	6500 [K]		R2	114,0	0,95	2,20	238,3	9,0	110	70	28,0

Při porovnání parametrů jednotlivých LED uvedených v tabulkách 2.1 a 2.2 bylo zamítnuto několik typů světelných diod k použití pro zdroj svítidla v trendu HCL z následujících důvodů:

- Cree XLamp XB-D z důvodu nízkého indexu R_a a vysoké hodnoty tepelného odporu R_{j-sp} světelné diody s dominantní vlnovou délkou 527,5 nm (zelená) ve srovnání s ostatními LED.
- Cree XLamp XP-E2 kvůli příliš vysoké hodnotě tepelného odporu R_{j-sp} světelné diody s dominantní vlnovou délkou 527,5 nm (zelená).
- Osram Ostar Projection Compact z důvodu chybějící bílé LED s hodnotou T_{CH} cca 4000 K.
- Osram Oslon Signal z důvodu vyšší cenové náročnosti a přibližně dvakrát vyšší hodnoty tepelného odporu R_{j-sp} ve srovnání s Osram Oslon SSL150 při téměř stejné velikosti diody. Také bílá LED má nízkou hodnotu indexu R_a .

Srovnání Osram Oslon SSL150 a Cree XLamp XQ-E

Po snížení možností výběru bylo nutné rozhodnout mezi diodami Cree XLamp XQ-E a Osram Oslon SSL150. Pro přesnější porovnání těchto dvou zástupců bylo provedeno reálné měření jednotlivých LED. Hlavním důvodem měření světelných diod bylo však získání přesných vstupních dat pro následující část 2.2.3. Řízení spektrálního složení světelného zdroje a pro optický návrh svítidla (podkap. 2.3). Měření probíhalo za asistence odborníků ve světelné laboratoři na Ústavu Elektroenergetiky nacházející se na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně. Jednalo se o běžné měření světelného toku a spektrálního složení světelného zdroje, které bylo provedeno v kulovém integrátoru s použitím spektrometru Jeti Specbos 1211UV. Kompletní výsledná naměřená data a podrobnější údaje z měření jsou uvedena v příloze B a C. V tabulce 2.3 jsou zobrazena změřená data použitá pro srovnání Cree XLamp XQ-E a Osram Oslon SSL150. Hodnoty jsou uvedeny vždy pro jednu LED diodu.

Dle porovnání v tabulkách 2.1, 2.2 a 2.3 byly vybrány pro zdroj svítidla v trendu HCL světelné diody OSRAM Oslon SSL150. Důvody jsou následující:

- Vyšší světelný tok červené (R) a zelené (G, TG) diody oproti Cree XQ E.
- Vyšší hodnoty indexů R_a a R_f diody Oslon SSL 150 GW CSHPM1.CM oproti Cree XQ E bílým diodám. Pod osvětlením tohoto typu LED bude tedy vjem předmětu pro lidské oko přirozenější, příjemnější a podobnější dennímu světlu.
- Diody OSRAM Oslon SSL150 mají obecně u všech barev lepší tepelný management. Nižší hodnota tepelného odporu R_{j-sp} a téměř dvakrát větší plocha LED diody značí rychlejší přestup tepla. Snaha je zajistit co nejmenší rozdíl teplot mezi rozhraními.
- LED SSL150 GW CSHPM1.CM je nejbližší zvolené ideální hodnotě teploty chromatičnosti 4000 K pro aplikaci v této práci.

Mezi nevýhody světelných diod SSL150 patří zejména větší cenová náročnost a mírně vyšší hodnota odchylky od čáry teplotních zářičů Δ_{uv} ve srovnání s Cree XQ E. Jelikož je finanční stránka při návrhu svítidla druhořadým kritériem a hodnota odchylky Δ_{uv} je v rámci mezí stanovených v části 1.6.2 ($\pm 0,0054$), jsou tyto nedostatky zcela přijatelné.

2.2.2 Výpočet světelného toku zdroje svítidla

Na základě zpracování návrhu osvětlení místnosti v softwaru Dialux EVO, který byl tvořen paralelně s kapitolou 2 této práce, byla zjištěna přibližná hodnota světelného toku, který by mělo svítidlo do prostoru vyzářovat. Celkový světelný tok svítidla by měl dle simulace dosahovat hodnoty 3100 lm

Tabulka 2.3: Srovnání světelných diod Cree XLamp XQ-E a Osram Oslon SSL150 na základě naměřených dat (příloha B, C).

Název	Označení	Barva	Světelný tok [lm]	Index podání barev R_a [-]	Colour fidelity index R_f [-]	Gamut index R_g [-]	Δ_{uv} [-]	T_{CH} [K]	Dopředné napětí U_d^a [V]	Dopředný proud I_d [A]
OSRAM Oslon Signal	GR CSHPM1.23	R	134,7	-	-	-	-	-	2,47	1,00
	GT CSHPM1.13	TG	224,0	-	-	-	-	-	3,59	1,00
	GB CSHPM1.13	B	42,9	-	-	-	-	-	3,17	1,00
	GW CSHPM1.CM	W	249,7	91,3	89,0	96,0	0,0036	4119	3,20	1,00
Cree XLamp	XQ E HI (High Intensity)	R	91,5	-	-	-	-	-	2,58	1,00
		G	160,2	-	-	-	-	-	3,52	1,00
		RB	43,1	-	-	-	-	-	3,40	1,00
		NW	254,3	81,2	79,0	98,0	0,0010	4611	3,14	1,00
Cree XLamp	XQ E HD (High Density)	R	112,1	-	-	-	-	-	2,54	1,00
		G	174,7	-	-	-	-	-	3,52	1,00
		RB	1261,1	-	-	-	-	-	3,40	1,00
		NW	251,3	75,7	74,0	95,0	0,0007	4682	3,13	1,00

^aDopředné napětí U_d jedné LED počítáno dělením celkového změřeného napětí při napájení všech 6 LED diod jejich počtem.

při vyzařování bílého světla. Aby ale bylo možné dosáhnout takového světelného toku, je nutné zvolit předpokládanou hodnotu účinnosti svítidla a dle parametrů změřených v předchozí části vypočítat množství LED diod, které bude pro dosažení hodnoty 3100 lm dostačující. Pro svítidla podobné konstrukce nabývá účinnost obvykle hodnoty 65 %, proto bylo počítáno s tímto číslem jako odhadovanou účinností celého systému. Světelný zdroj musí tedy vyzařovat světelný tok

$$\Phi_e = \frac{3100}{65} \cdot 100 = 4769 \text{ lm.}$$

Zdroj se světelným tokem 4769 lm lze vytvořit pomocí 30 ks LED diod OSRAM Oslon SSL150 vždy po 6 ks v barvách R, G, B a v množství 12 ks bílé led. Je důležité si při výpočtu uvědomit, že maximální světelný tok, který může svítidlo s takovýmto zdrojem vyzařovat je nutné počítat pro případ, kdy ze svítidla vystupuje světlo bílé barvy. V praxi totiž téměř nikdy nenastane situace, kdy jsou kanály všech barevných LED diod napájeny na maximální světelný tok. Informace v jakém poměru přibližně nastavit světelný tok jednotlivých R, G, B diod tak, aby tvořily aditivním mícháním barev bílé světlo cca 6500 K ($c_x = 0,3127$, $c_y = 0,329$), byla získána pomocí optimalizace v softwaru LightTools. Do prostředí tohoto softwaru pro optický design byly vloženy 3 barevné LED diody (GR CSHPM1.23, GT CSHPM1.13 a GB CSHPM1.13), umístěn detektor snímající T_{CH} a CIE souřadnice c_x a c_y . LED GT CSHPM1.13 vyzařující zelenou barvou světla byla ponechána na maximální možný světelný tok (224 lm). Následně bylo optimalizací zjištěno, že dosáhnout bílého světla pomocí R, G, B diod lze jednak nastavením červené LED GR CSHPM1.23 přibližně na 48 % maximálního světelného toku zelené LED. A modré světelné diody GB CSHPM1.13 na 12 % světelného toku zelené LED. Výstupem je tak bílé světlo o $T_{CH} = 5865 \text{ K}$ a souřadnicích $c_x = 0,32526$, $c_y = 0,32224$. Výpočet světelného toku zdroje svítidla je potom následující

$$\Phi_{e,i} = \text{světelný tok 1 ks LED (tab. 2.3)} \cdot \text{procentuální snížení toku} \cdot \text{celkový počet LED}, \quad (2.1)$$

$$\Phi_{e,RED} = 134,7 \cdot 0,48 \cdot 6 = 387,9 \text{ lm,}$$

$$\Phi_{e,GREEN} = 224 \cdot 1 \cdot 6 = 1344 \text{ lm,}$$

$$\Phi_{e,BLUE} = 42,9 \cdot 0,12 \cdot 6 = 30,9 \text{ lm,}$$

$$\Phi_{e,WHITE} = 249,7 \cdot 1 \cdot 12 = 2996,4 \text{ lm.}$$

Předpokládaný světelný tok z celého zdroje se potom rovná

$$\Phi_{celk} = \Phi_{e,RED} + \Phi_{e,GREEN} + \Phi_{e,BLUE} + \Phi_{e,WHITE} = 4759,2 \text{ lm.}$$

Dle tohoto výpočtu byly při optickém návrhu svítidla v podkapitole 2.3 nastaveny hodnoty světelného toku zdroje jednotlivých LED diod v softwaru LightTools na všech simulacích.

2.2.3 Řízení spektrálního složení světelného zdroje

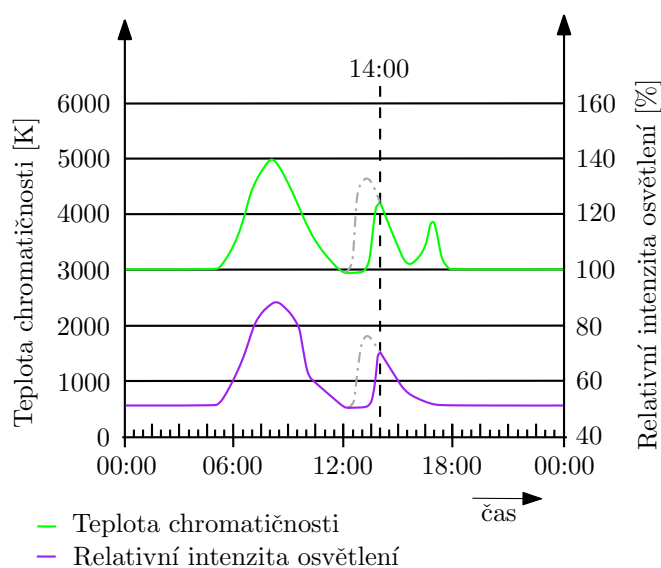
Základní vlastnost, kterou nemůže svítidlo zaměřené na působení světla na člověka postrádat, je dynamické řízení hodnoty T_{CH} a intenzity osvětlení. V podkapitole 1.7 byly definovány dva možné způsoby řízení svítidla dle normy DIN SPEC 67600. Jelikož osvětlovací soustava bude navrhována pro prostory mateřské školy, bylo zvoleno řízení vnitřního osvětlení přizpůsobené aktivitám osob

pobývajících v osvětlovaných prostorech. Pro názorný příklad byl zcela náhodně vybrán denní časový harmonogram Mateřské školy Leskovec n. M., dle kterého byl upraven graf řízení zdroje na obrázku 1.23 [56]. Harmonogram je zobrazen v tabulce 2.4.

Tabulka 2.4: Denní časový harmonogram Mateřské školy Leskovec n. M. [56].

6:30 – 7:30	scházení dětí, ranní hry, individuální činnosti s dětmi, činnosti řízené učitelkou
7:30 – 8:00	individuální práce s dětmi s odloženou školní docházkou, didakticky zacílené činnosti
8:00 – 8:30	ranní cvičení
8:30 – 9:00	hygiena, svačina
9:00 – 9:30	řízená činnost
9:30 – 11:30	příprava na pobyt venku, pobyt venku
11:30 – 12:00	hygiena, oběd
12:00 – 12:30	hygiena, příprava na spánek
12:30 – 14:00	odpočinek, náhradní aktivity místo spánku
14:00 – 14:30	hygiena, odpolední svačina
14:30 – 15:30	volné hry, odchod domů

Jelikož je čas obědu a odpočinku stanoven dle harmonogramu od 11:30 do 14:00, je nutné upravit křivku řízení spektrálního složení a intenzity zdroje svítidla. Na obrázku 2.2 je zobrazena upravená část zelenou barvou. Úprava zahrnovala pouze prodloužení času odpočinku posunutím doby nárůstu hodnot T_{CH} a intenzity osvětlení o jednu celou hodinu.



Obrázek 2.2: Řízení vnitřního dynamického osvětlení během jednoho 24 hodinového cyklu upravené pro konkrétní aplikaci v předškolním zařízení Mateřská škola Leskovec n. M. Zelenou a fialovou barvou jsou vyznačeny upravené křivky.

K optimalizaci spektrálního složení zdroje svítidla byl použit kalkulátor ColorCalculator 7.23 od firmy Osram Sylvania, který umožňuje používat téměř všechny nástroje hodnotící kvalitu návrhu zmíněné v podkapitole 1.6. Jako vstup do kalkulátoru byla použita naměřená data spektrálního složení zdroje svítidla z části 2.2.1, která jsou uvedena v příloze B a C. K řízení zdroje navrhovaného

svítidla může být použit například digitální protokol pro ovládání světelných zařízení DMX512, u kterého lze rozlišit až 256 různých stavů. Proto byly jednotlivé kanály LED diod navázány na tento protokol a byl vytvořen tak model lineárního řízení světelného zdroje pomocí čtyř kanálů (R, G, B, W) s rozsahem od 0 do 256. Výsledné optimalizované DMX hodnoty jednotlivých kanálů LED jsou pro rozmezí teplot chromatičnosti od 3000 K do 5000 K s krokem $100\text{ K} \pm 30\text{ K}$ zobrazeny v tabulce 2.5 společně s veličinami hodnotícími kvalitu světla vyzařovaného zdrojem. Jelikož není optimalizace zdroje spektrálního složení svítidla jednou z hlavních částí této práce, bude její popis a postup úmyslně opomenut.

Z tabulky 2.5 určené k řízení spektrálního složení zdroje svítidla je možné posoudit kvalitu navrhovaného zdroje světla. To umožňují průměrné hodnoty jednotlivých veličin, počítané jako aritmetický průměr vždy z celého sloupce tabulky. Výsledné hodnoty jsou následující: $R_a = 91,6$; $R_f = 91,6$; $R_g = 104,2$; $\Delta_{uv} = 0,00289$; $D_{uv} = 0,003$. Svítidlo v trendu HCL tedy dosahuje poměrně vysokých hodnot indexů hodnotících vjem barvy R_a , R_f a má značnou podobnost s denním světlem. Byly také dodrženy odchylky Δ_{uv} a D_{uv} určující, do jaké míry se vyzařované spektrum svítidla podobá bílému dennímu světlu. Hodnota Gamut indexu $R_g = 104,2$ podává informaci, že navrhované svítidlo bude produkovat sytosti barev velmi podobné jako při osvětlení denním světlem. Odstíny osvětlovaných předmětů nebudou značně přesaturované ani podsaturované. V této fázi návrhu jsou splněny dvě základní podmínky, abychom mohli svítidlo zařadit do kategorie Human Centric Lighting osvětlení. A to dynamické řízení svítidla v čase a značná podobnost spektrálního složení s denním světlem. Cena, kterou bude muset uživatel zaplatit za takovéto umělé osvětlení je větší spotřeba energie díky nižšímu světelnému výtěžku [lm/W] a vysoká pořizovací cena.

V posledních 7 sloupcích tabulky 2.5 jsou zobrazeny veličiny hodnotící působení světla na lidský organismus, konkrétně na jednotlivé fotopigmenty obsažené v sítnici oka. Pro názornost je na obrázku 2.3 porovnáno, jak moc stimuluje vyzařované světlo fotoreceptory lidského oka pro nastavení zdroje na teplotu chromatičnosti 5000 K a 3000 K. Největší rozdíl je patrný u fotopigmentu melanopsinu a S jodopsinu. Pro nastavení 5000 K jsou tyto dva fotopigmenty více osvětlovány, čímž dochází k většímu stimulu cirkadiálního rytmu, a tak k povzbuzení bdělosti a aktivity osob pobývajících pod tímto světlem. Poslední sloupec tabulky 2.5 zobrazuje činitel cirkadiální účinnosti, který s jeho rostoucí hodnotou značí také rostoucí stimulus cirkadiálního systému lidského těla. Při teplotě 5000 K se jeho hodnota $a_{v,mel} = 0,72$ velmi blíží číslu, jaké nabývá normalizované denní světlo D50 ($a_{v,mel,D50} = 0,77$).

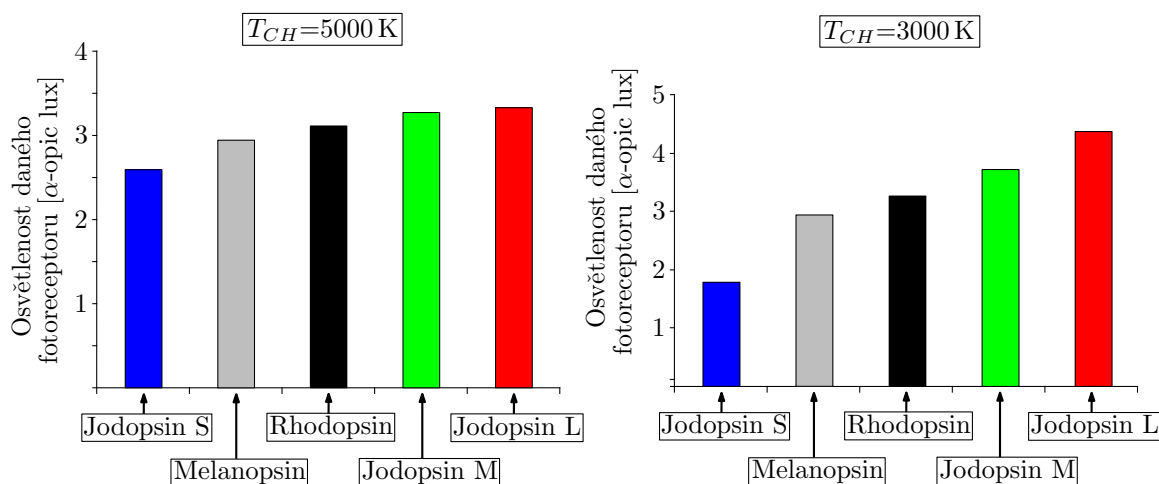
Tabulka 2.5: Optimalizované hodnoty dynamického řízení světelného zdroje pomocí digitálního protokolu DMX512.

$T_{CH,h}^a$ [K]	DMX R [-]	DMX G [-]	DMX B [-]	DMX W [-]	DMX	Φ^b [lm]	T_{CH}^c [K]	R_a [-]	Δ_{uv} [-]	D_{uv} [-]	R_f [-]	R_g [-]	Jod. S [α -opic lux]	Jod. M [α -opic lux]	Jod. L [α -opic lux]	Melan. [α -opic lux]	Rhod. [α -opic lux]	Jod. [α -opic lux]	$a_{mel,v}$ [-]
3000	52	26	0	133	1779	3023	71,1	0,00533	-0,00536	81,2	111,2	1,71	3,56	4,20	2,82	3,13	4,15	0,62	
3100	47	22	0	141	1844	3098	74,9	0,00528	-0,00537	83,7	110,3	1,70	3,41	3,98	2,70	2,99	3,95	0,62	
3200	41	18	0	150	1920	3184	79,2	0,00525	-0,00532	86,5	109,1	1,69	3,26	3,77	2,58	2,85	3,75	0,62	
3300	34	13	0	159	1989	3284	84,0	0,00510	-0,00519	89,4	107,7	1,68	3,11	3,56	2,47	2,71	3,55	0,63	
3400	23	3	0	171	2060	3424	91,5	0,00532	-0,00540	92,9	105,1	1,67	2,89	3,26	2,29	2,51	3,27	0,63	
3500	21	3	0	177	2128	3519	93,4	0,00401	-0,00412	93,3	103,9	1,67	2,88	3,22	2,29	2,51	3,24	0,64	
3600	18	4	0	184	2211	3620	95,4	0,00264	-0,00273	93,6	102,8	1,67	2,87	3,18	2,29	2,50	3,21	0,64	
3700	18	7	0	188	2273	3692	95,3	0,00084	-0,00094	93,4	102,5	1,68	2,93	3,23	2,35	2,57	3,26	0,64	
3800	12	4	0	197	2354	3830	98,2	0,00091	+0,00031	93,2	100,5	1,67	2,85	3,10	2,29	2,50	3,14	0,64	
3900	12	8	0	201	2422	3907	98,0	0,00231	+0,00218	93,2	100,2	1,68	2,91	3,14	2,35	2,57	3,20	0,65	
4000	12	12	0	205	2490	3978	97,7	0,00418	+0,00403	93,0	99,7	1,68	2,97	3,19	2,41	2,64	3,25	0,65	
4100	20	20	4	206	2557	4089	93,3	0,00146	-0,00155	93,1	104,5	2,14	3,16	3,38	2,68	2,88	3,43	0,68	
4200	17	21	4	212	2628	4206	95,0	0,00020	+0,00006	93,5	103,4	2,14	3,15	3,34	2,68	2,88	3,40	0,68	
4300	17	25	4	216	2696	4273	95,0	0,00208	+0,00188	93,4	103,0	2,14	3,21	3,38	2,73	2,95	3,45	0,68	
4400	13	26	4	223	2778	4396	96,3	0,00372	+0,00360	93,6	101,8	2,14	3,20	3,34	2,73	2,95	3,42	0,69	
4500	18	27	9	228	2850	4513	93,0	0,00333	-0,00345	92,3	105,4	2,59	3,25	3,41	2,89	3,05	3,46	0,72	
4600	18	32	9	231	2912	4579	93,2	0,00153	-0,00158	92,5	105,2	2,59	3,31	3,45	2,95	3,12	3,51	0,72	
4700	14	33	9	238	2993	4714	94,7	0,00033	+0,00016	92,9	104,1	2,59	3,30	3,41	2,95	3,12	3,48	0,72	
4800	14	38	9	241	3055	4776	94,7	0,00217	+0,00201	93,1	103,8	2,59	3,36	3,46	3,00	3,19	3,53	0,72	
4900	10	39	10	247	3124	4916	95,3	0,00397	+0,00385	93,1	102,6	2,59	3,35	3,41	3,00	3,19	3,50	0,72	
5000	5	35	10	255	3190	5002	94,0	0,00083	+0,00390	92,2	101,8	2,59	3,28	3,33	2,95	3,12	3,42	0,72	

^aHledaná teplota chromatičnosti

^bSvětelný tok zdroje svítidla

^cVýsledná teplota chromatičnosti



Obrázek 2.3: Metoda α -osvětlení: Grafy vyjadřující míru stimulu jednotlivých fotopigmentů lidského oka při osvětlování navrženým světelným zdrojem, vlevo pro nastavení zdroje na hodnotu T_{CH} 5000 K, vpravo pro 3000 K.

Na konci této části je důležité poznamenat, že výše provedený postup řízení spektrálního zdroje svítidla může být aplikován pouze na prostory mateřské školy. Pokud by se jednalo o jiný typ osvětlovaného prostoru, je vhodné provést návrh znovu a zvážit zejména rozsah měnících se hodnot T_{CH} a světelného toku zářivého ze zdroje svítidla. Nabízí se také využitelnost návrhu a řízení spektrálního složení zdroje svítidla uvedeným v této práci i v jiných výrobcích obsahujících RGBW LED diody. Postup návrhu světelného zdroje HCL svítidla by však bylo nutné projít znova od samého začátku.

2.3 Optický návrh svítidla

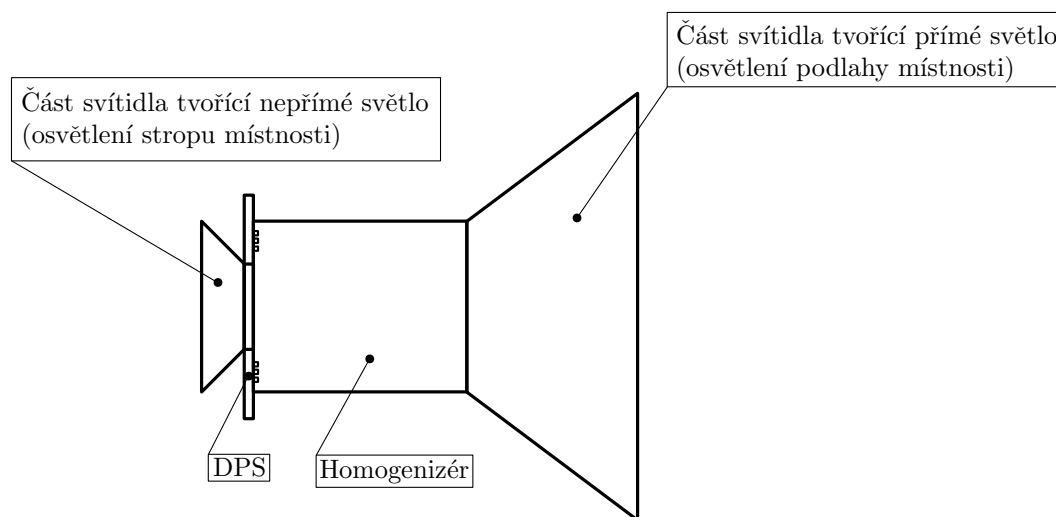
V podkapitole 2.1 byly definovány cíle návrhu, na základě kterých byl následně definován světelný zdroj v podkapitole 2.2. Ten slouží jako vstupní prvek optickému návrhu svítidla, který je stěžejní částí této práce. Celý optický návrh probíhal v softwaru pro optický design LightTools. Software nabízí americká společnost Synopsys a pro účely této práce byla poskytnuta plná verze toho programu firmou Robe Lighting s.r.o. Během zpracování návrhu je důležité pomýšlet na kvalitu světla jako na prioritní parametr návrhu a finanční stránku řadit mezi méně důležité aspekty optického návrhu. Ověření funkčnosti a plnění zákonných požadavků interiérového osvětlení bude následně ověřeno v kapitole 3 a 4, kde bude optický návrh užitý jako funkční produkt osvětlovací soustavy. Vlastnosti povrchů jednotlivých dílů optického návrhu jsou vyrobitelné a byly voleny převážně z knihovny obshující software LightTools.

2.3.1 Koncept

Při tvorbě konceptu svítidla bylo v první řadě důležité zvolit způsob osvětlení prostoru. Podle rozložení světelného toku vycházejícího ze zdroje světla do dolního nebo horního poloprostoru se rozlišují osvětlovací soustavy na přímé, smíšené a nepřímé. U přímé osvětlovací soustavy je veškerý světelný tok směřován do dolního poloprostoru a dopadá přímo na osvětlované plochy (pracovní stůl, podlaha apod.). Tím, že světelný tok dopadá na osvětlované plochy přímo a téměř beze ztrát,

je tato soustava nejekonomičtější pro danou hodnotu osvětlenosti. Nevýhodou při použití pouze jednoho svítidla je, že v místnosti dochází k tvorbě ostrých tmavých stínů a velkých kontrastů jasu. Důsledkem toho je výrazná nerovnoměrnost osvětlenosti a velká pravděpodobnost oslnění osob, provádějících zrakové úkony v tomto prostoru. Tuto nevýhodu přímé osvětlovací soustavy je možné snížit, popřípadně zcela eliminovat volbou smíšené či nepřímé osvětlovací soustavy. U smíšené osvětlovací soustavy zdroj světla vyzařuje svůj světelný tok zároveň do dolního i horního poloprostoru. Na osvětlovanou plochu tak dopadá nejen přímé světlo ze zdroje, ale i odražené od stěn a stropu. Rovnoměrnost osvětlení je vyšší a v osvětlovaném prostoru vznikají měkčí stíny a menší kontrasty. Díky tomu je možnost oslnění v zorném poli menší, než u přímé osvětlovací soustavy. Nepřímá osvětlovací soustava je pravým opakem přímé soustavy. Všechny vyzařovaný světelný tok je směřován do horního poloprostoru. Tím na osvětlovanou plochu nedopadá žádné přímé světlo, ale pouze světlo odražené prostřednictvím stěn a stropu místnosti, které se chovají jako sekundární zdroje světla. Při použití této osvětlovací soustavy je osvětlení místnosti téměř rovnoměrné, stíny se v prostoru v podstatě nevyskytují a přímé i odražené oslnění je prakticky vyloučeno. Nevýhodou je, že je tím ztíženo rozlišování, orientace v prostoru i odhad vzdálenosti. V porovnání s ostatními soustavami je nepřímá osvětlovací soustava nejméně hospodárná, a to kvůli své vyšší energetické náročnosti a nárokům na údržbu. To je dáno tím, že světelný tok z prvotních zdrojů světla dopadá nejdříve na plochu stropu místnosti, od které se následně odráží a rozptyluje do prostoru. Protože povrch stropu nebude rozhodně ideální zrcadlo, budou zde vznikat ztráty. Aby byla tedy dosažena u této soustavy intenzita osvětlení na ploše zrakového úkonu stejná jako u přímé osvětlovací soustavy, je zapotřebí mnohem vyššího výkonu primárních zdrojů světla [10].

Na základě definovaných požadavků a cílů v podkapitole 2.1 byl vytvořen koncept závěsného svítidla s důrazem na kvalitu světla a vliv na člověka. Účinnost a finanční stránka celého optického systému byly považovány za druhořadé. Vzniklý koncept vedoucí k finálnímu řešení je typem smíšeného osvětlení, jak je vidět na obrázku 2.4.



Obrázek 2.4: Koncept závěsného svítidla v trendu HCL.

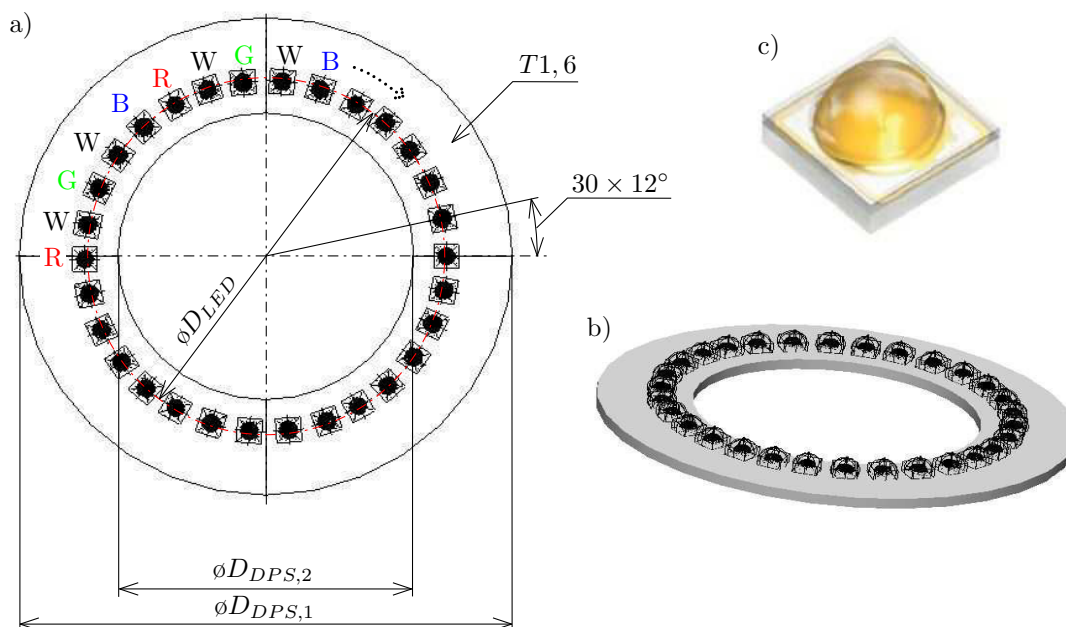
Skládá se ze čtyř částí: DPS, homogenizér, část svítidla tvořící nepřímé světlo a část svítidla tvořící přímé světlo. Deska plošných spojů slouží k osazení LED světelných diod a elektronických součástek, které jsou propojeny vodiči tvořenými tenkou plochou kovovou vrstvou na povrchu desky. Homogenizér slouží v optické soustavě k „promíchání barev“ a dosažení barevně homo-

genního výstupu ze svítidla. Úkolem zbylých dvou částí svítidla je tvarovat světelný výstup z homogenizéru do dolního (přímé světlo) a horního (nepřímé světlo) poloprostoru.

Souběžně s celou podkapitolou 2.3 byl vypracováván návrh osvětlení mateřské školy v softwaru Dialux EVO (více v kapitole 3), ve kterém byla zvolena běžná hodnota výšky místnosti 3,1 m a délka závěsu svítidla 0,5 m pod stropem.

2.3.2 DPS

V podkapitole 2.2 byla zpracována část návrhu desky plošných spojů. Byl zvolen typ LED diody, jejich počet a změřen světelný tok a spektrální složení celého zdroje svítidla. V této části zbývá definovat rozměry DPS, rozmístění LED diod a provést základní výpočet tepelného managementu. Jelikož bude mít svítidlo symetrický světelný výstup, je vhodné rozmístit LED diody také symetricky. Diody byly tedy rozmístěny na DPS do tvaru kružnice. Souřadnice x, y každé diody byly navázány v softwaru LightTools na parametr K , aby bylo možné měnit průměr ϕD_{LED} kružnice LED diod v průběhu návrhu ostatních částí svítidla. Při volbě uspořádání světelných diod na DPS byla snaha, co nejvíce od sebe oddálit diody červené a zelené barvy. Důvodem je skutečnost, že lidské oko je dle křivky poměrné spektrální citlivosti fotopického $V(\lambda)$ vidění na obrázku 1.8 při výběru dvou barev ze skupiny červené, modré a zelené LED, nejcitlivější na barevnou kombinaci červené a zelené diody [64]. Člověk potom při pobytu v osvětlovaném prostoru nejlépe zachytí lidským okem barevnou nehomogenitu světelného výstupu mezi červenou a zelenou diodou. Rozmístění LED je zobrazeno na obrázku 2.5.



Obrázek 2.5: Návrh DPS: a) schéma rozmístění LED a rozměrů DPS; b) 3D model desky plošných spojů v prostředí softwaru LightTools; c) Osram Osolon SSL150 GW CSHPM1.CM (převzato z www.osram.com).

Výpočet tepelného managementu zdroje svítidla

Zjednodušený výpočet tepelného managementu v této práci zahrnuje zohlednění přechodů mezi dvěma částmi světelného zdroje a okolím: LED–DPS–Okolím. První přechod mezi LED a DPS je charakterizován vlastnostmi pájky (dielektrika), které jsou zadány výrobcem desky plošných spojů. Druhý přechod je počítán z údajů o tloušťce DPS, její tepelné vodivosti a plochy, skrz kterou teplo prostupuje. Pro účely této práce byl zvolen jako materiál dielektrika běžně používaný izolovaný kovový substrát (Insulated Metallic Substrate) s tloušťkou vrstvy $75 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ a tepelnou vodivostí $2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [68]. Tloušťka DPS byla zvolena 1,6 mm, materiál hliník (Al) o tepelné vodivosti $237 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [54]. Hodnota tepelného přechodu R_{j-sp} a velikost diody je vždy udávána výrobcem diody (tab. 2.1). Tepelné přechody mezi pájkou, DPS a okolím jsou vypočteny následovně (podkap. 1.9)

$$R_{sp-pcb} = \frac{L_1}{\lambda_1 \cdot S_1} = \frac{75 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 0,0031^2} = 3,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1},$$

$$R_{pcb-a} = \frac{L_2}{\lambda_2 \cdot S_2} = \frac{L_2}{\lambda_2 \pi \cdot \left[\frac{D_{DPS,1}^2}{4} - \frac{D_{DPS,2}^2}{4} \right]} = \frac{1,6 \cdot 10^{-3}}{237 \pi \cdot \left[\frac{0,06^2}{4} - \frac{0,036^2}{4} \right]}$$

$$= 0,003731 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}.$$

Cílem výpočtu tepelného managementu LED je nalezení takové hodnoty maximální teploty chladicí soustavy, aby byla dodržena výrobcem udávaná horní mez teploty PN přechodu (junction temperature). Pro Osram Oslon SSL150 by dle výrobce neměla teplota na PN přechodu přesáhnout 135°C . V tabulce 2.6 jsou uvedeny hodnoty tepelných odporů a teplotních rozdílů jednotlivých přechodů pro všechny čtyři barvy světelných diod. Následně je v posledním sloupci tabulky 2.6 uvedena tato maximální teplota chladicí soustavy. Nejnižší a z hlediska teplotního managementu kritická hodnota 107°C je u zelené diody GT CSHMP1.13. Jelikož byl vynechán vliv přechodu mezi DPS a chladicí soustavou, bude vhodné vytvořit určitou teplotní rezervu a stanovit jako maximální možnou teplotu chladicí soustavy 100°C .

Tabulka 2.6: Základní výpočet tepelného managementu LED Osram Oslon SSL150.

Označení	Tepelný tok P_t [W] ^a	Tepelný odpor R_{j-sp} [W ^{m-1} K ⁻¹]	Teplotní rozdíl ΔT_{j-sp} [°C]	Tepelný odpor R_{sp-pcb} [W ^{m-1} K ⁻¹]	Teplotní rozdíl ΔT_{sp-pcb} [°C]	Teplotní rozdíl ΔT_{pcb-a} [°C]	Celkový tep- lotní rozdíl ^b ΔT [°C]	Maximální možná teplota chladičí soustavy ^c
GR CSHPM1.23	1,85	2,5	4,6	3,9	7,2	0,209	12,1	122,9
GT CSHPM1.13	2,69	6,4	17,2	3,9	10,5	0,209	27,9	107,1
GB CSHPM1.13	2,38	4,6	10,9	3,9	9,3	0,209	20,4	114,6
GW CSHPM1.CM	2,40	4,2	10,1	3,9	9,4	0,209	19,6	115,4

^aTepelný tok je počítán dle naměřených dat uvedených v tabulce 2.3 jako: $P_t = 0,75 \cdot I_d \cdot U_d$ [W].

^bCelkový teplotní rozdíl je počítán jako součet dílčích teplotních rozdílů: $\Delta T = \Delta T_{j-sp} + \Delta T_{sp-pcb} + \Delta T_{pcb-a}$.

^cTeplota chladičí soustavy, po jejíž překročení není zaručeno dodržení výrobcem udávané maximální teploty PN přechodu (pro OSRAM Oslon SSL150 $T_{j,max} = 135^\circ C$)

Teplotní rozdíl ΔT_{pcb-a} uvedený v tabulce 2.6 byl počítán dle (podkap. 1.9)

$$\begin{aligned}\Delta T_{pcb-a} &= R_{pcb-a} \cdot 0,75 \cdot (6 \cdot P_{RED} + 6 \cdot P_{GREEN} + 6 \cdot P_{BLUE} + 12 \cdot P_{WHITE}) \\ &= 0,003731 \cdot (6 \cdot 2,47 + 6 \cdot 3,59 + 6 \cdot 3,17 + 12 \cdot 3,2) \\ &= 0,003731 \cdot 0,75 \cdot 74,58 = 0,209^{\circ}C.\end{aligned}$$

Z tohoto výpočtu je zřejmé, že celkový maximální příkon zdroje svítidla navrhovaného v této práci je přibližně 75 W.

Optické vlastnosti povrchu DPS

Povrch desky plošných spojů a její optické vlastnosti byly voleny dle německého výrobce Peters Group. Bílá maska na povrchu DPS (white solder mask) Elpemer SD 2491 SG-TSW-R5 má dle [65] odraznost téměř 93 % na celém rozsahu viditelné části světla s poklesem při nižších vlnových délkách (od 460 nm níže). Jelikož jsou ale na DPS osazeny LED světelné diody, které pohltí světlo na ně dopadající, je v reálném případě účinnost povrchu DPS nižší. V optickém návrhu v této práci zabírá plocha všech diod zhruba čtvrtinu celkové opticky účinné plochy desky plošných spojů. Proto byla nastavena při simulaci v LightTools vlastnost povrchu DPS na tzv. „smooth optical“ (tato optická vlastnost umožňuje nastavit uživateli hodnoty fresnelových koeficientů odrazu, lomu a absorpce v jednotkách %) s účinností o 23 % nižší než má bílá maska Elpemer SD 2491 SG-TSW-R5. Povrch DPS se tedy chová tak, že 70 % energie každého dopadajícího paprsku se odrazí, zbylých 30 % absorbuje materiál DPS a přemění se v teplo. Je důležité zmínit, že změna směru a změna energie paprsku po odrazu je také závislá na úhlu dopadu paprsku na plochu DPS. Při definici optických vlastností DPS však tento fakt zanedbáváme.

Během návrhu svítidla je nutné myslet na volný prostor potřebný pro umístění a montáž DPS, na kterém bude kromě světelných diod umístěno také několik dalších elektronických součástí a vodivých cest mezi nimi. Ray data potřebná pro simulaci v softwaru LightTools byly staženy ze stránek výrobce OSRAM Oslon SSL150 a vloženy do prostředí softwaru. Světelný tok každé z LED byl nastaven shodně s částí 2.2.2.

2.3.3 Homogenizér

Jedná se o prvek optické soustavy, který je tvořen tělesem vedoucí světlo od DPS k prvku tvořícímu přímé osvětlení (zřejmě reflektoru). Jak lze chápat z názvu optického členu soustavy, je hlavním účelem homogenizéru zajistit barevně homogenní výstup z obou stran tohoto dílu. Tedy zajistit dostatečné „promíchání barev“ jednotlivých LED diod. Kromě tohoto je ale nutné brát ohled i na další parametry. Při návrhu homogenizéru je kladen důraz na:

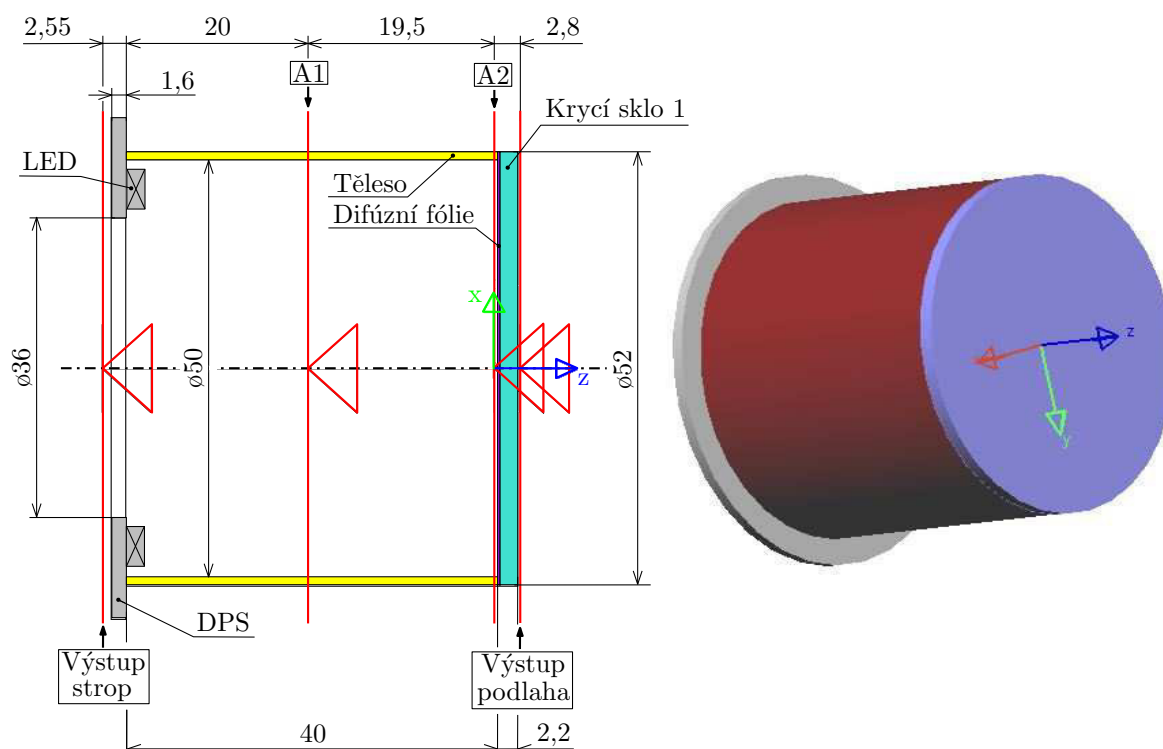
- barevnou homogenitu světla vyzařujícího z obou výstupů homogenizéru,
- rovnoměrné rozložení intenzity na obou výstupech homogenizéru,
- poměr světelného toku zářícího z výstupu na strop ku výstupu na podlahu místnosti,
- energetické ztráty homogenizéru.

Kromě těchto čtyř uvedených kritérií je snaha o dosažení co nejmenší velikosti světelného zdroje optické soustavy svítidla. Dle obecné vlastnosti světla typicky používané v nezobrazovací optice nazývané „Etendue“, „optický invariant“ nebo „Lagrangeův invariant“ (také v anglickém jazyce „extent“, „throughput“ nebo „acceptance“), je vhodné u optického systému tohoto typu dosáhnout pro jednotlivé členy optické soustavy co nejmenší velikosti světelného zdroje [61, 62]. Výpočet

podmínky Etendue pro reflektor lze dohledat v [62] na straně 385, kde dle vzorce A3.3 je patrné, že s rostoucí velikostí zdroje roste i množství světla vyzařujícího z homogenizéru, které není ovlivněno částí svítidla tvarující světelný svazek (například reflektorem). Takové světlo pak tvoří kolem svítidla parazitní paprsky, které mohou způsobovat například oslnění nebo osvětlení těch částí prostoru, které nejsou pro to určeny.

První návrh

První návrh vychází téměř z nejjednoduššího možného tvaru tělesa, kterým je válec. Je vyobrazen na obrázku 2.6 a skládá se z DPS, tělesa pro vedení světla (válec) a krycího skla.



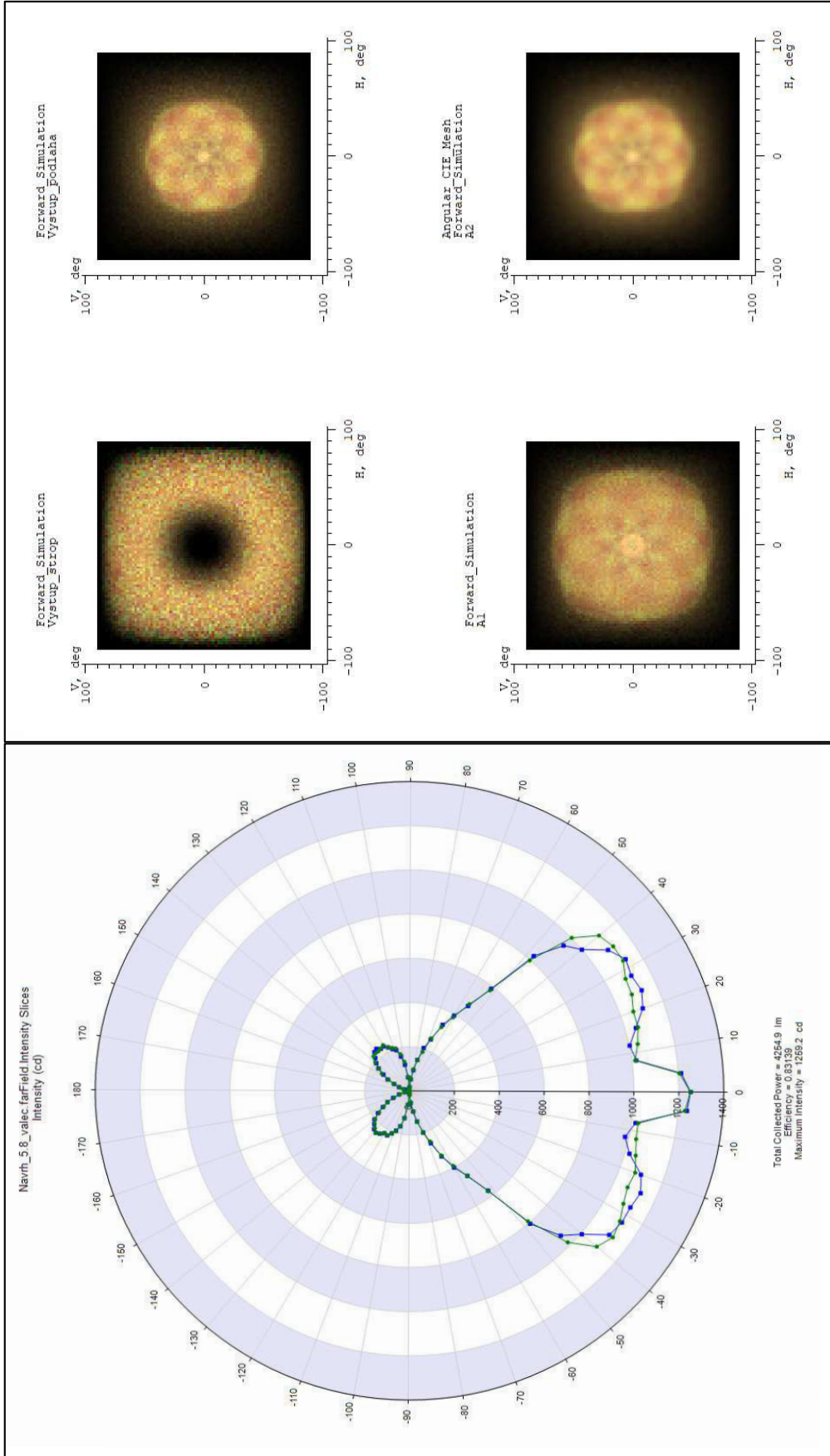
Obrázek 2.6: Homogenizér–první návrh: Vlevo schéma s rozměry homogenizéru, vpravo 3D model v softwaru LightTools.

Materiál a optické vlastnosti povrchu DPS byly definovány v předchozí části. Otvor pro vstup světla za účelem nasvícení stropu je nastaven na největší možný průměr $\phi D_{DPS,2} = 36 \text{ mm}$ při nejmenším možném průměru kruhu diod $\phi D_{LED} = 44 \text{ mm}$ (důvod viz „Etendue“). Velikost vnějšího průměru DPS je pouze orientačně zvolena na $\phi D_{DPS,2} = 60 \text{ mm}$, jeho hodnota však závisí na návrhu elektroniky umístěné na DPS, kterou se ale tato práce nezabývá. Dalším důležitým prvkem homogenizéru je těleso. Aby nebyla volba opticky účinného povrchu tělesa pro vedení světla závislá na technologii jeho výroby, je uvažováno vložení fólie s definovanou odrazností na vnitřní povrch tělesa. Jelikož je hlavním cílem homogenizéru dosáhnout barevně homogenního výstupu ze svítidla, byla zvolena difúzní odrazná fólie (reflective film) od firmy Fusion Optix. Díky difúznímu povrchu tělesa bude uvnitř homogenizéru docházet k značně většímu množství odrazů světla než při použití zrcadlového povrchu. Difúzní rozptyl světla by měl tedy zajistit dostatečnou barevnou homogenitu na obou výstupech. Odrazná fólie má označení PET97WR–150A, hodnota odraznosti

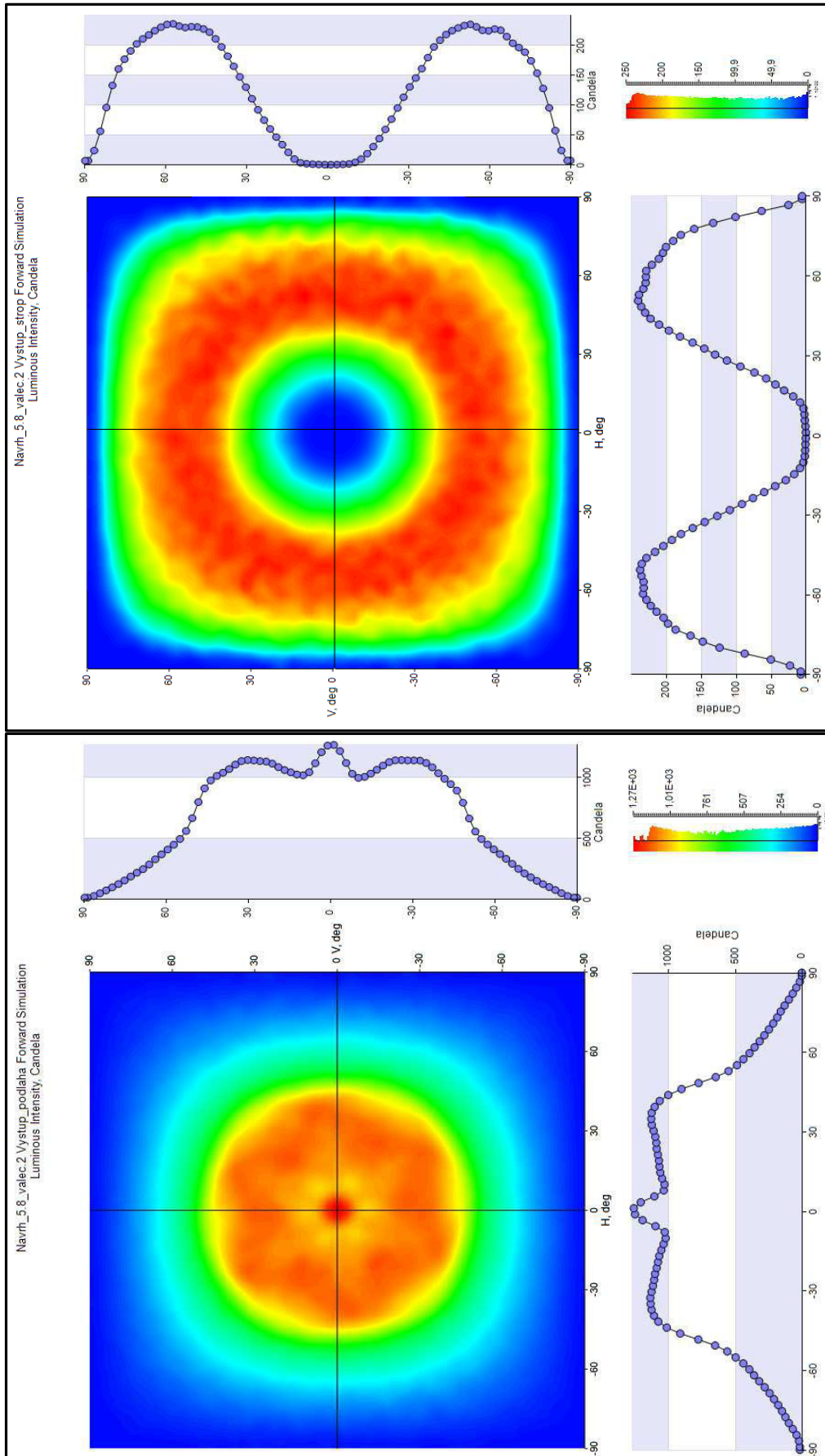
dosahuje 97%, z čehož zastupuje 91 % difúzní odraz a zbylých 6 % odraz zrcadlový. Data pro simulaci v LightTools byly poskytnuty firmou ROBE Lighting ve formátu BSDF (viz příloha D). Tento formát dat udává fresnelovy koeficienty odrazu, lomu a abrobrce (R, T, A) pro jednotlivé úhly dopadu na povrch materiálu. Nezhledňuje však změnu směru šíření paprsků a změnu energie v závislosti na vlnové délce λ dopadajícího světla. Krycí sklo je v návrhu uvažováno pouze za účelem uzavření světelného zdroje z důvodu zamezení vzniku prachu, tím zvýšení životnosti svítidla. Totožné sklo bude později umístěno i na druhý výstup homogenizéru osvětlující strop. Materiál skla je běžně používané optické sklo BK7 o tloušťce 2 mm s opatřením antireflexní vrstvy na obou stranách skla pro snížení ztrát při průchodu světla materiálem.

Optimalizace homogenizéru je provedena v softwaru LightTools. Počet paprsků trasovaných z každého zdroje je nastaven na 300 000, počet paprsků vycházejících z celého světelného zdroje svítidla je tedy roven číslu 12 600 000. Následně jsou do prostředí softwaru umístěny 4 plošné detektory ve tvaru kruhu o průměru 60 mm ve vzdálenostech 2,55 mm; 20 mm; 39,5 mm a 42,5 mm od DPS. Roviny jsou zobrazeny na obrázku 2.6 červenou barvou. Názvy detektorů byly zvoleny na *Výstup strop*, *A1*, *A2* a *Výstup podlaha*. Rozlišení rovin je nastaveno na hodnotu 80×80 binů pro analýzu barevné homogenity světla vyzařujícího z obou výstupů homogenizéru. Jedna buňka je tedy rovna čtverci o straně 0,6 mm, hodnota error estimate average se u všech plošných detektorů pohybuje v rozmezí od 8,9 % do 12,2 %. Rozložení intenzity na obou výstupech je sledováno na totožných rovinách o velikosti 80×80 binů, kde na jednu buňku připadá 1260 paprsků. Dále byl v simulaci umístěn detektor ve vzdáleném poli ve tvaru koule s nekonečným průměrem. Na tomto detektoru je nastavena velikost jedné buňky na 5°.

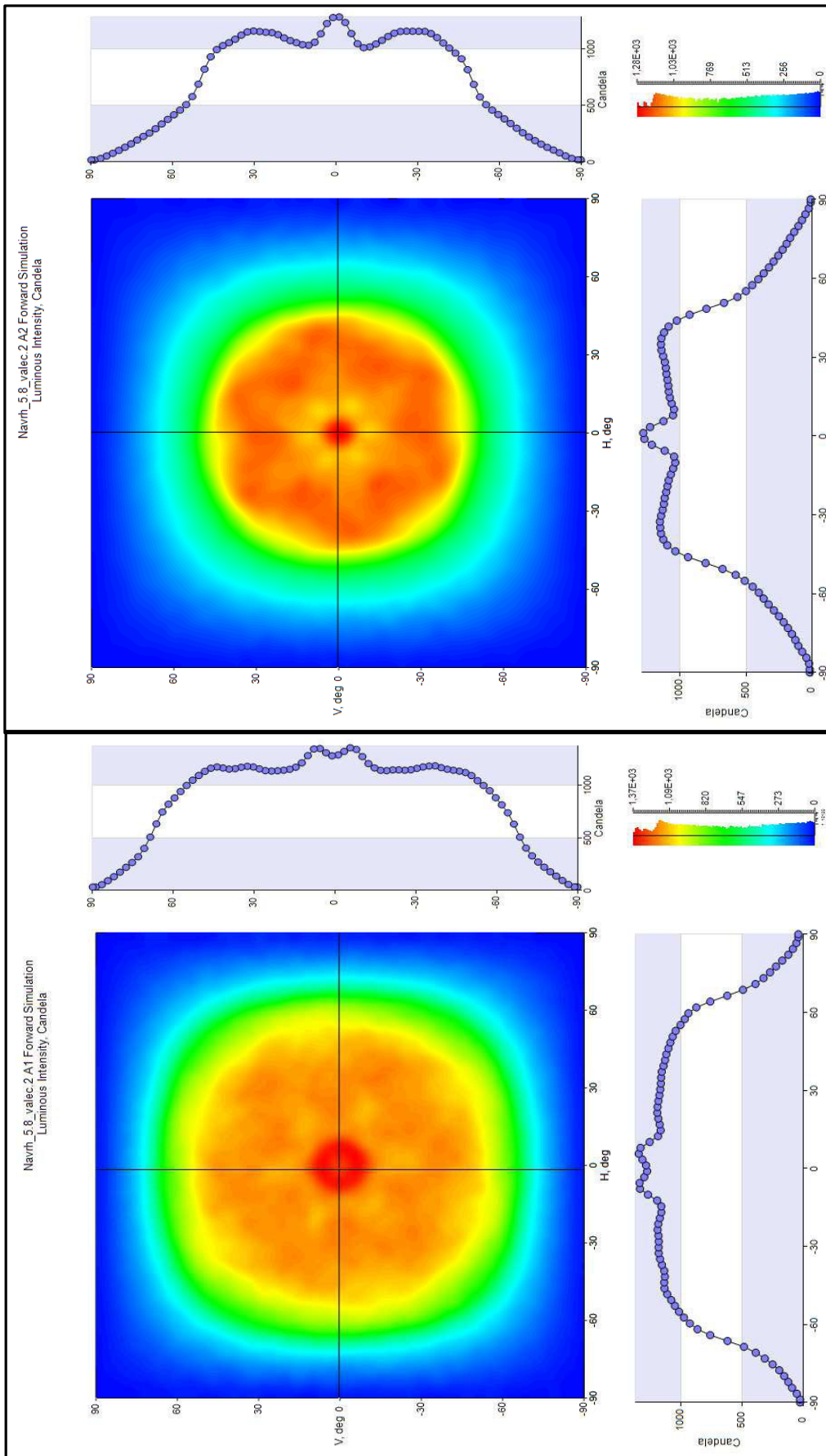
Po simulaci chodu paprsků optickou soustavou vytvořenou v programu LightTools je možné na detektoru ve vzdáleném poli na obrázku 2.7 vlevo pozorovat polární graf vystupujícího světla z obou otvorů homogenizéru, na kterém je vidět příliš velká středová intenzita v rozmezí od -10° do 10° na detektoru *Výstup podlaha* do spodního poloprostoru (podlaha). Naopak na *Výstupu strop* úplně chybí světlo v úhlu od -160° do 160°. Potvrdit si to je možné na detektorech zobrazujících rozložení světla na obrázku 2.8, kde je tento nedostatek znázorněn zřetelněji. Plošné detektory *A1* a *A2* jsou zobrazeny na obrázku 2.9 z důvodu porovnání rozložení intenzity a barevné homogenity přibližně v polovině délky homogenizéru a těsně před krycím sklem. Dále lze z výsledků zobrazených na těchto snímačích usoudit, že krycí sklo nemá vliv na rozložení intenzity a barevnou homogenitu detektoru *Výstup podlaha*. Barevnou homogenitu lze posuzovat na obrázku 2.7 vpravo, na kterém jsou zobrazena data všech čtyř plošných detektorů. Pouze na detektoru *Výstup strop* je pozorovatelná homogenita, ostatní detektory zobrazují barevně nehomogenní data. První návrh tedy zcela nevyhovuje z hlediska rovnoměrného rozložení intenzity na obou výstupech. Výstup do spodního poloprostoru navíc nevyhovuje z hlediska barevné homogenity.



Obrázek 2.7: První návrh homogenizéru: Vlevo zobrazeny křivky svítivosti na detektoru ve vzdáleném poli. Vpravo barevná nehomogenita na všech detektorech zobrazena nástrojem True Color Raster Chart.

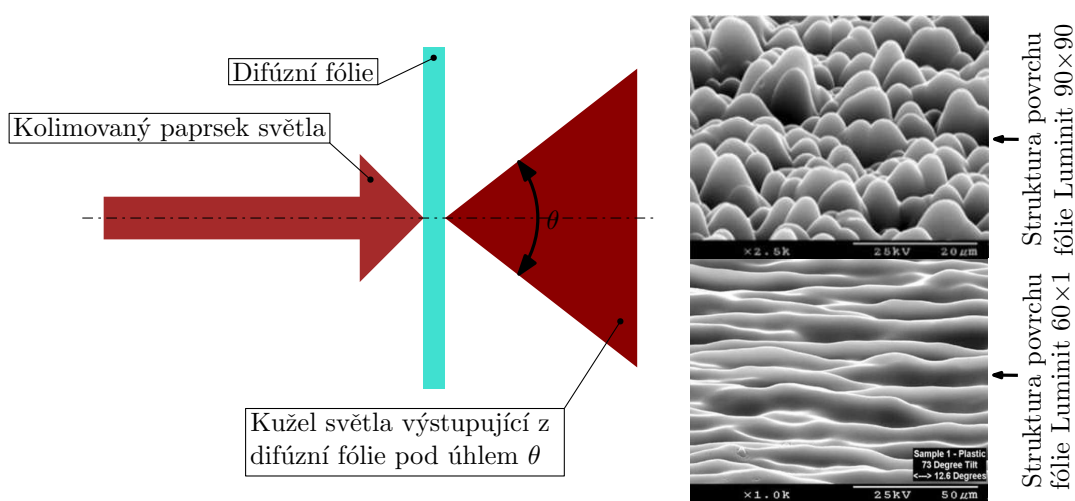


Obrázek 2.8: První návrh homogénizéru: Na výstupu homogénizéru do spodního poloústroju (vlevo) i horního poloústroju (vpravo) je patrné nerovnoměrné rozložení intenzity světla.



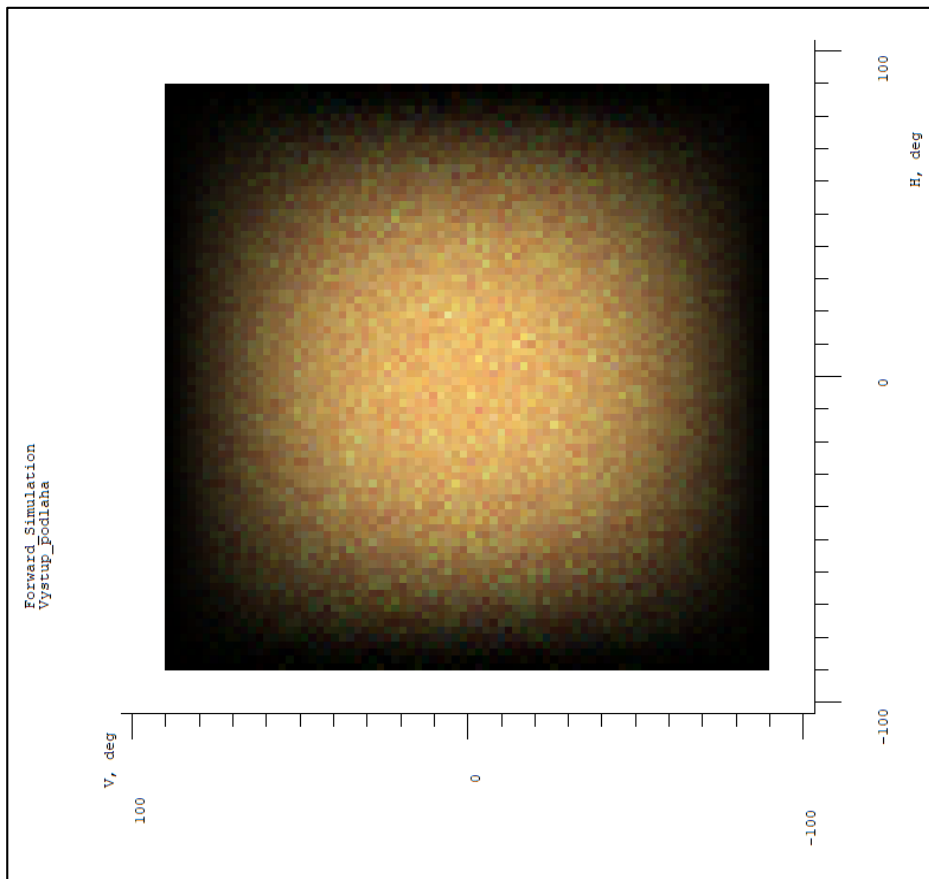
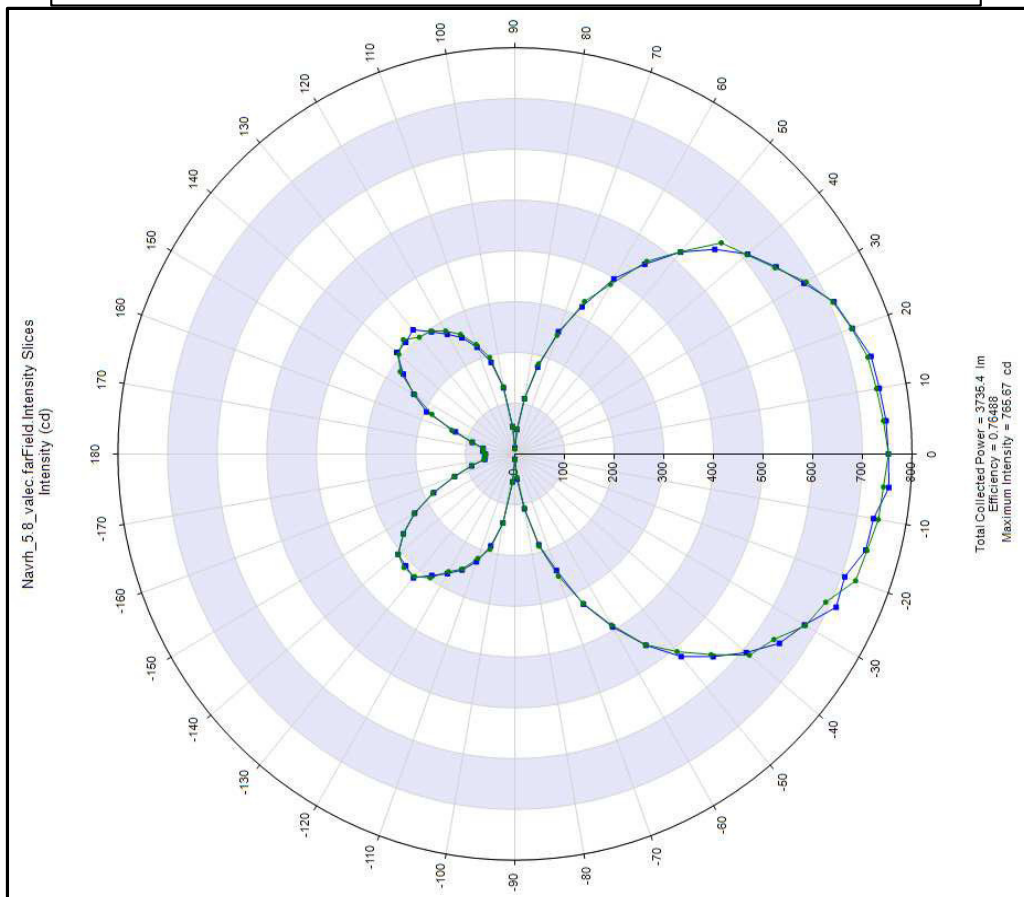
Obrázek 2.9: První návrh homogenizéru: Záznam svítivosti na rovinném detektoru v polovině délky homogenizéru a ve vzdálenosti 0,6 mm před krycím sklem
1.

Pro odstranění některých nedostatků prvního návrhu je použita symetrická difúzní fólie (Light diffusing film) 80×80 od firmy Luminit, která je dostupná v knihovně LightTools. Jedná se o tenkou polymerní fólii o tloušťce cca od 0,2 do 0,3 mm. Je vyrobena z polykarbonátu a na jedné straně opatřena strukturou, která ovlivňuje procházející paprsek světla. Při průchodu kolimovaného paprsku tvaruje struktura vytvořená na povrchu fólie procházející světlo do kužele, který je definovaný typem struktury a označením fólie, viz obrázek 2.10. Například označení Luminit 80×80 vyjadřuje velikost úhlu kužele $\theta = 80^\circ$ v obou na sebe kolmých rovinách. Taková fólie se nazývá symetrická. Existují i asymetrické fólie, u které je úhel θ v obou rovinách odlišný [63].

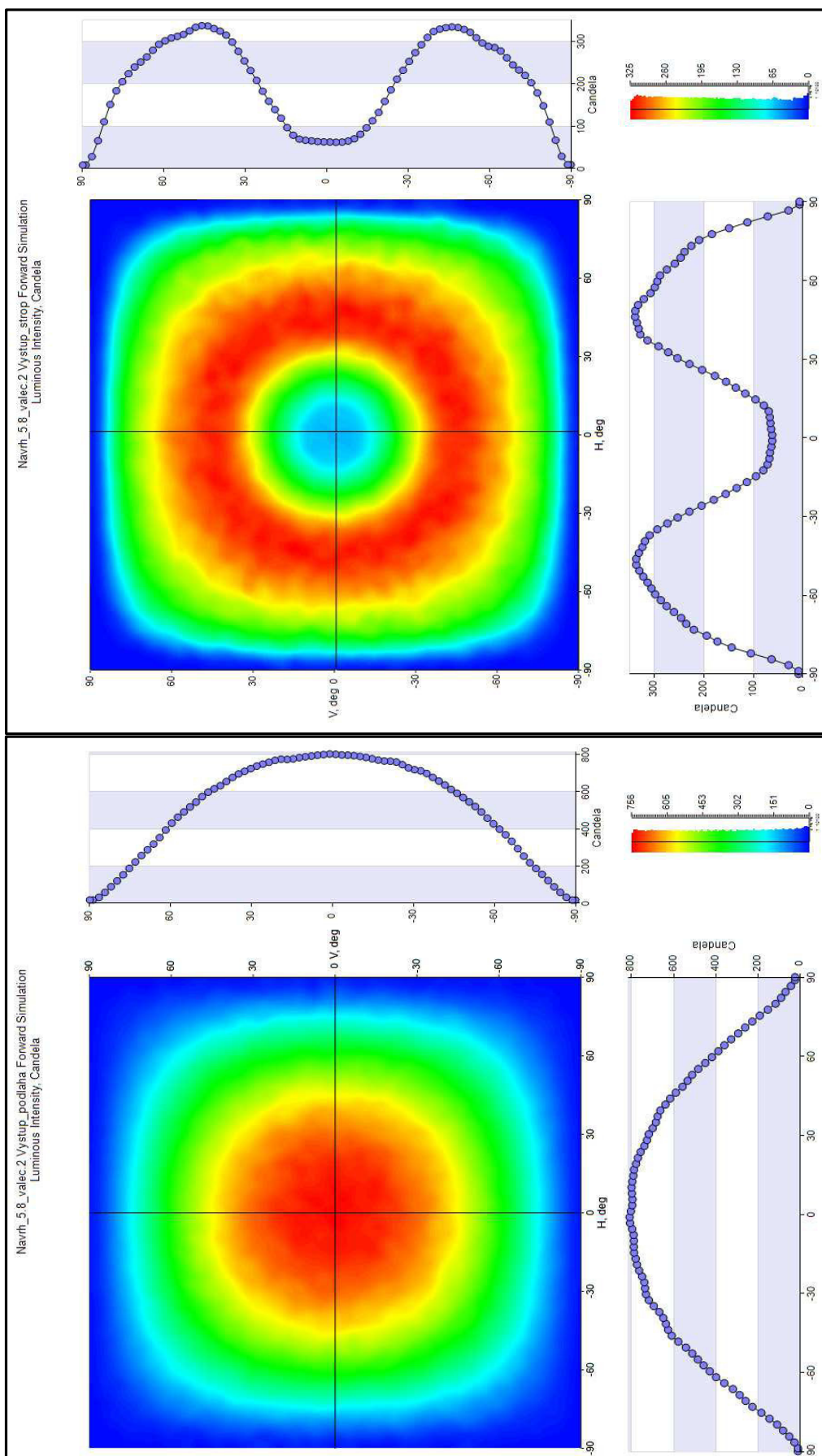


Obrázek 2.10: Difúzní fólie: Vlevo zobrazen princip funkce difúzní fólie. Vpravo snímky mikrostruktury povrchu fólie pořízeny na skenovacím (rastrovacím) elektronovém mikroskopu (SEM). Horní snímek zobrazuje strukturu difúzní fólie 90×90 tvořící symetrický výstup, struktura na spodním snímku je pro asymetrickou 60×1 fólii. [63].

Po přidání difúzní fólie mezi těleso homogenizéru a krycí sklo 1 jsou výsledky simulace zobrazeny na obrázcích 2.11 a 2.12. Přidáním fólie bylo dosaženo rovnoměrného rozložení intenzity a barevné homogenity na výstupu homogenizéru do spodního poloprostoru. Na polárním grafu na obrázku 2.11 vpravo jsou zobrazená data vyzařujícího světla do spodního poloprostoru velice podobná vyzařování, jaké má Lambertovský zářič. To je žádoucí pro pozdější tvarování světelného svazku reflektorem (část 2.3.5). Výstup strop je barevně homogenní, avšak stále chybí značná část světla v úhlu od -160° do 160° . Tento problém bude vyřešen později v části 2.3.4.



Obrázek 2.11: První návrh homogenizéru s dif. fólií: Vlevo zobrazen polární graf. Vpravo barevná homogenita na detektoru *Výstup podlaha*.



Obrázek 2.12: První návrh homogeneru s difúzní fólií: Detektor *Výstup podlaha* (vlevo) zobrazuje rovnoměrné rozložení světla klesající od středu k okrajům obrazce tvořeného světlem na rovině detektoru. Druhý detektor *Výstup strop* je stále nerovnoměrně osvětlen s malým příbytkem energie ve středu výstupu.

Poměr světelného toku vystupujícího z obou otvorů homogenizéru je společně s účinností celého systému zobrazen v tabulce 2.7. Získání informace, jaký světelný tok je potřeba pro nasvícení přímé a nepřímé části osvětlení, bylo docíleno pomocí simulace kompletního osvětlení místnosti, jako celku v softwaru Dialux EVO. Pomocí té bylo zjištěno, že cílem je dosáhnout následujících hodnot: Detektor *Výstup strop* → 23 %, Detektor *Výstup podlaha* → 77 %.

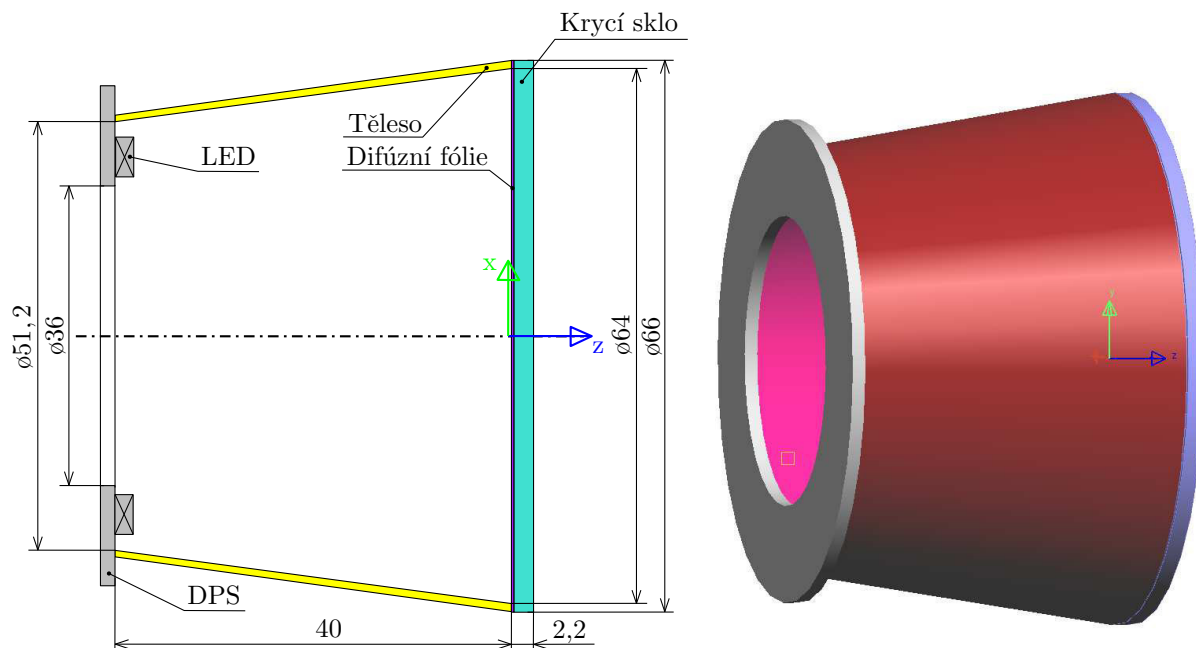
Tabulka 2.7: Přehled poklesu účinnosti systému na jednotlivých prvcích prvního návrhu.

Část homogenizéru	Účinnost celého systému
Pouze DPS	100,00 %
+ těleso homogenizéru	85,45 %
+ krycí sklo 1	83,14 %
+ difúzní fólie	76,49 %
Detektor <i>Výstup strop</i> → 35,02 % ^a	
Detektor <i>Výstup podlaha</i> → 64,98 % ^a	

^aMnožství energie v % vyzářené z jednoho výstupu vztahované k celkovému vystupujícímu toku z homogenizéru

Druhý návrh

Pro dosažení potřebného poměru výstupu z obou otvorů homogenizéru byly nalezeny dvě možnosti. První, méně výhodná metoda je zmenšení průměru $\phi D_{DPS,2}$ otvoru homogenizéru osvětlujícího strop místnosti na hodnotu 25,2 mm při současném zachování rozměrů ostatních dílů. Účinnost systému tak klesne o téměř 6 %. Na BSDF datech (fresnelovy koeficienty R, T, A) použité difúzní fólie Luminit 80×80 obsažených v knihovně LightTools lze pozorovat, že značná část světla dopadajícího na fólii se odrazí zpět do tělesa homogenizéru. Největší část tohoto odraženého světla by měla být tak použita na osvětlení stropu. Zmenšením průměru $\phi D_{DPS,2}$ dochází k většímu uzavření vnitřního prostoru homogenizéru, omezení přímého světla vedoucího od difúzní fólie na strop, početnější odrazům světla uvnitř tělesa homogenizéru a tak poklesu účinnosti celého systému. To je hlavním důvodem, proč nebyla tato možnost akceptována. Druhá, výhodnější varianta homogenizéru je zobrazena na obrázku 2.13. Průměr $\phi D_{DPS,2}$ byl ponechán na původní hodnotě 36 mm a požadovaného poměru světelného toku zářícího z výstupu na strop a podlahu bylo dosaženo tvarováním tělesa homogenizéru. Při zvyšování velikosti průměru výstupu homogenizéru na podlahu se současným zachováním ostatních rozměrů se díky změně tvaru tělesa odrazí méně světla zpět do homogenizéru, a více energie prostoupí skrz difúzní fólii na podlahu. Zvyšuje se tak účinnost celého systému a klesá množství energie vyzářující na strop místnosti.



Obrázek 2.13: Druhý návrh homogenizéru: Vlevo schéma s rozměry homogenizéru, vpravo 3D model v softwaru LightTools.

Všechny parametry simulace (i polohy a nastavení detektorů) byly totožné s nastavením u prvního návrhu. Výsledky jsou zobrazeny na následujících obrázcích 2.14 a 2.15. V tabulce 2.8 jsou uvedeny hodnoty účinnosti druhého návrhu a procentuální rozdělení světelného toku vycházejícího z jednotlivých otvorů. Potřebného poměru je dosaženo dokonce s účinností o 3 % vyšší oproti prvnímu návrhu.

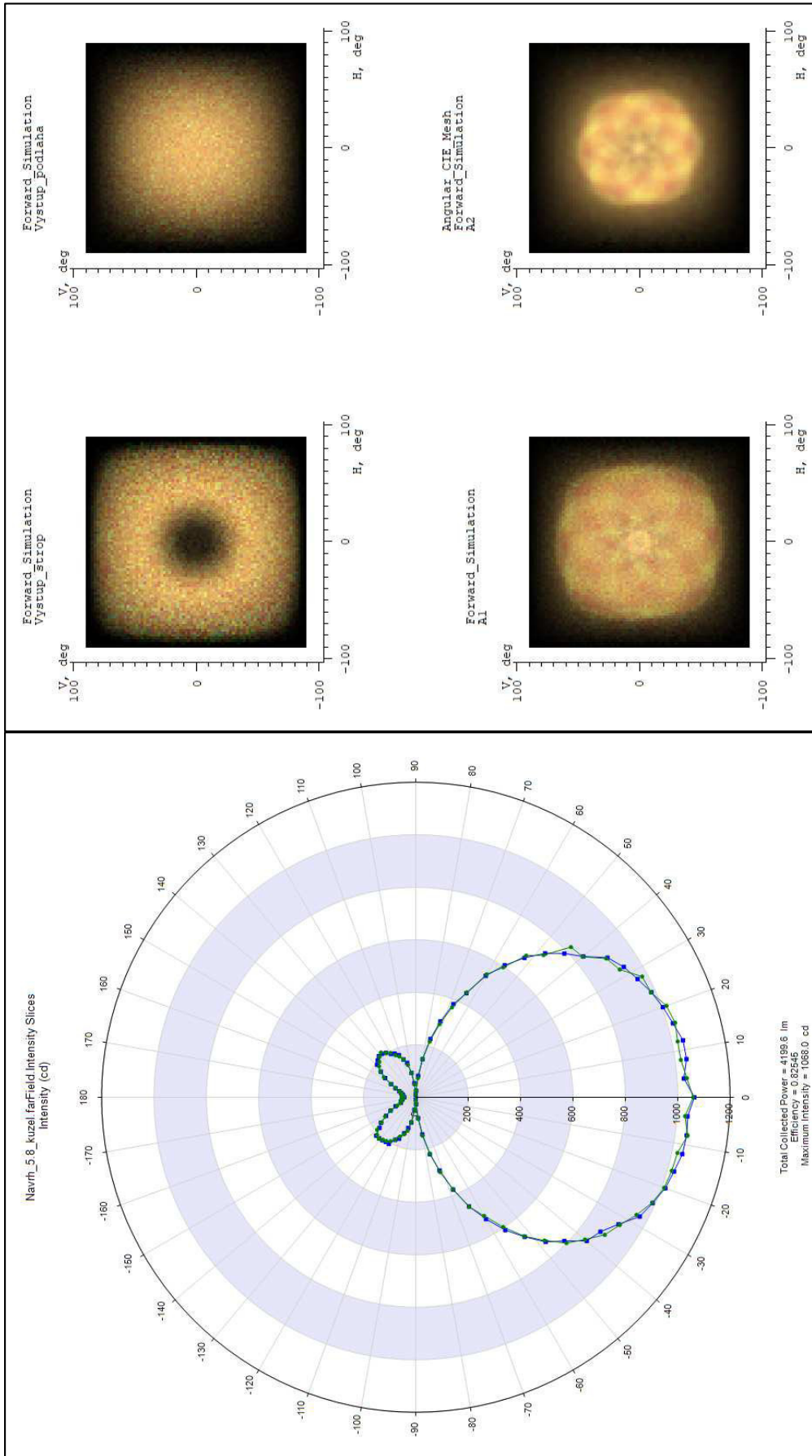
Tabulka 2.8: Přehled poklesu účinnosti systému na jednotlivých prvcích druhého návrhu.

Část homogenizéru	Účinnost celého systému
Pouze DPS	100,00 %
+ těleso homogenizéru	88,32 %
+ krycí sklo 1	87,51 %
+ difúzní fólie	79,56 %

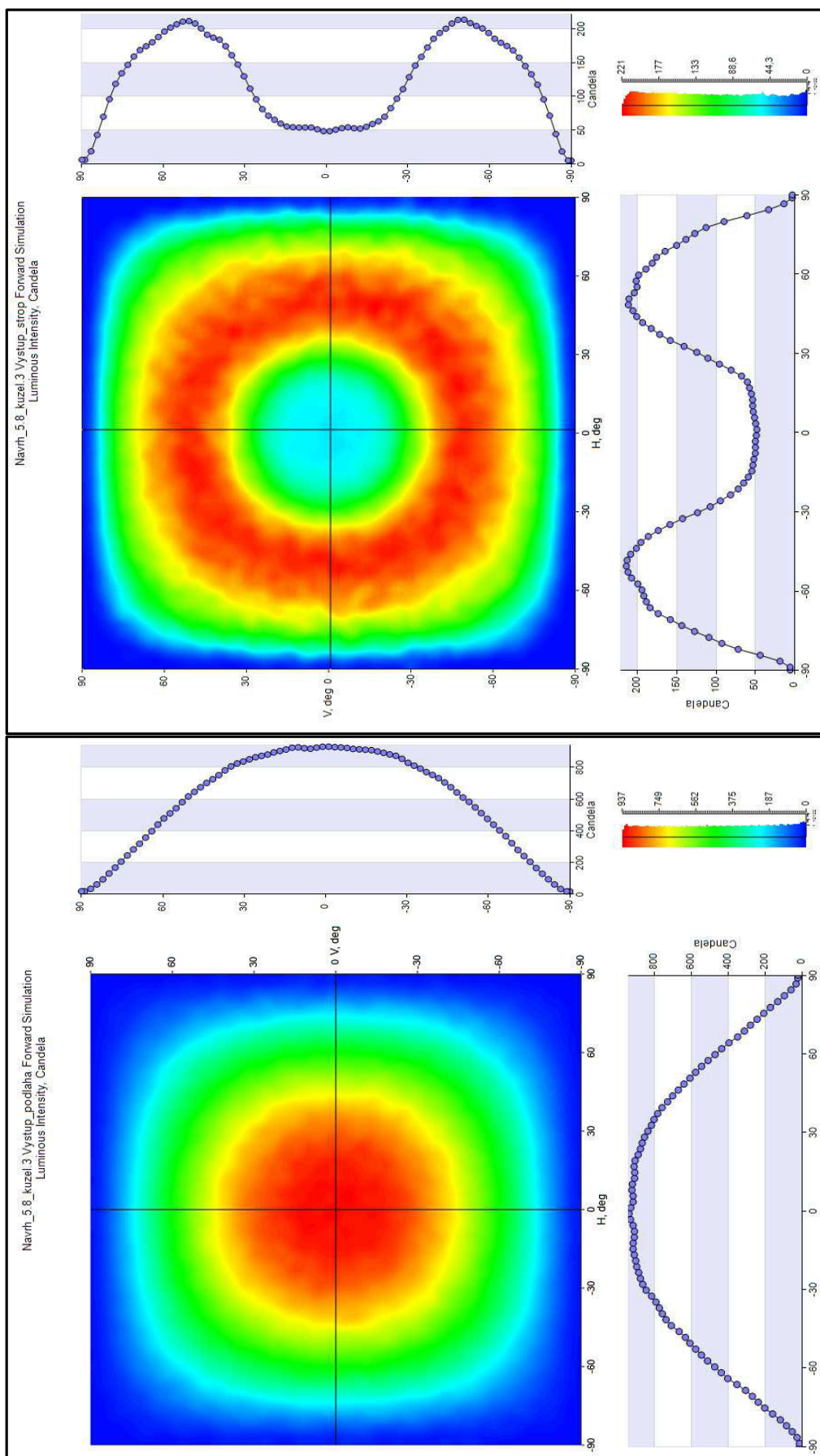
Detektor *Výstup strop* → 22,82 %^a

Detektor *Výstup podlaha* → 77,18 %^a

^aMnožství energie v % vyzářené z jednoho výstupu vztahované k celkovému vystupujícímu toku z homogenizéru



Obrázek 2.14: Druhý návrh homogenizéru: Vlevo zobrazeny křivky svítivosti na detektoru ve vzdáleném poli. Vpravo patrná barevná homogenita na detektorech *Výstup strop* a *Výstup podlaha* i umístěných uvnitř homogenizéru.

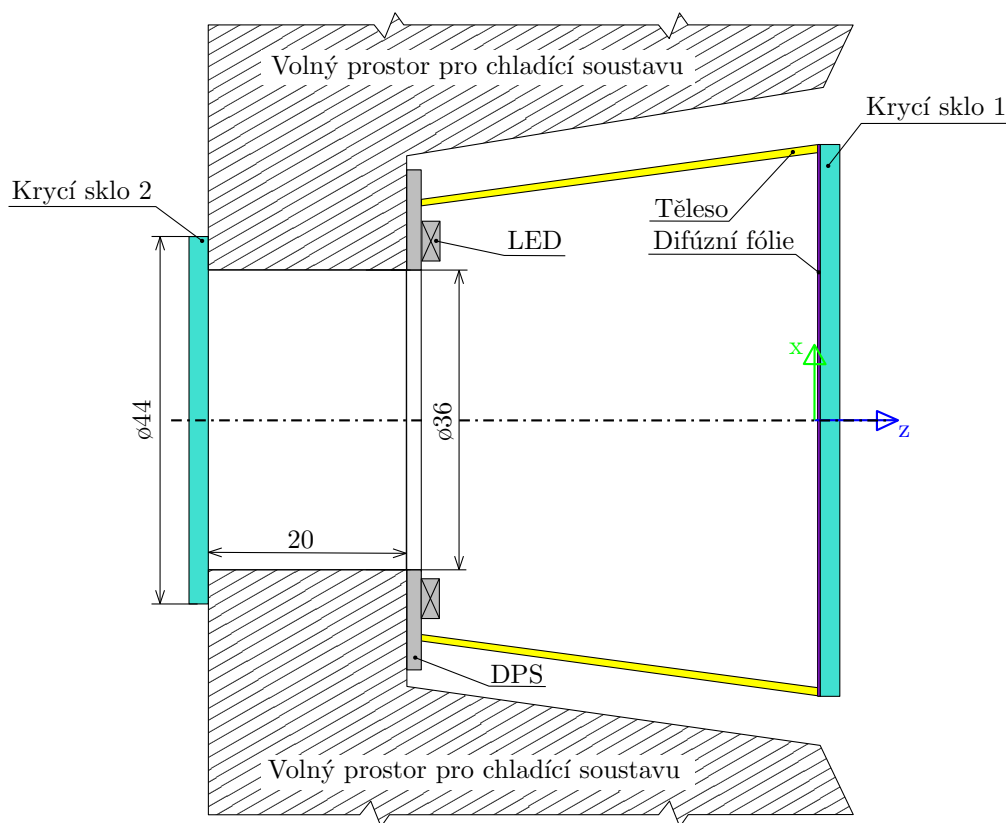


Obrázek 2.15: Druhý návrh homogenizéru: Detektor *Výstup podlaha* (vlevo) zobrazuje rovnoměrné rozložení světla téměř shodně s prvním návrhem, pouze o 100 lx vzrostla maximální osvětlenosti. Vpravo uveden detektor *Výstup strop*, který je stále nerovnoměrně osvětlen.

Druhý návrh splňuje téměř všechny stanovené požadavky na homogenizér, kromě rovnoměrnosti rozložení intenzity detektoru *Výstup na strop*. Je možné tedy považovat návrh homogenizéru jako finální a přejít k tvorbě dalších částí optického návrhu svítidla.

2.3.4 Část svítidla tvořící nepřímé světlo

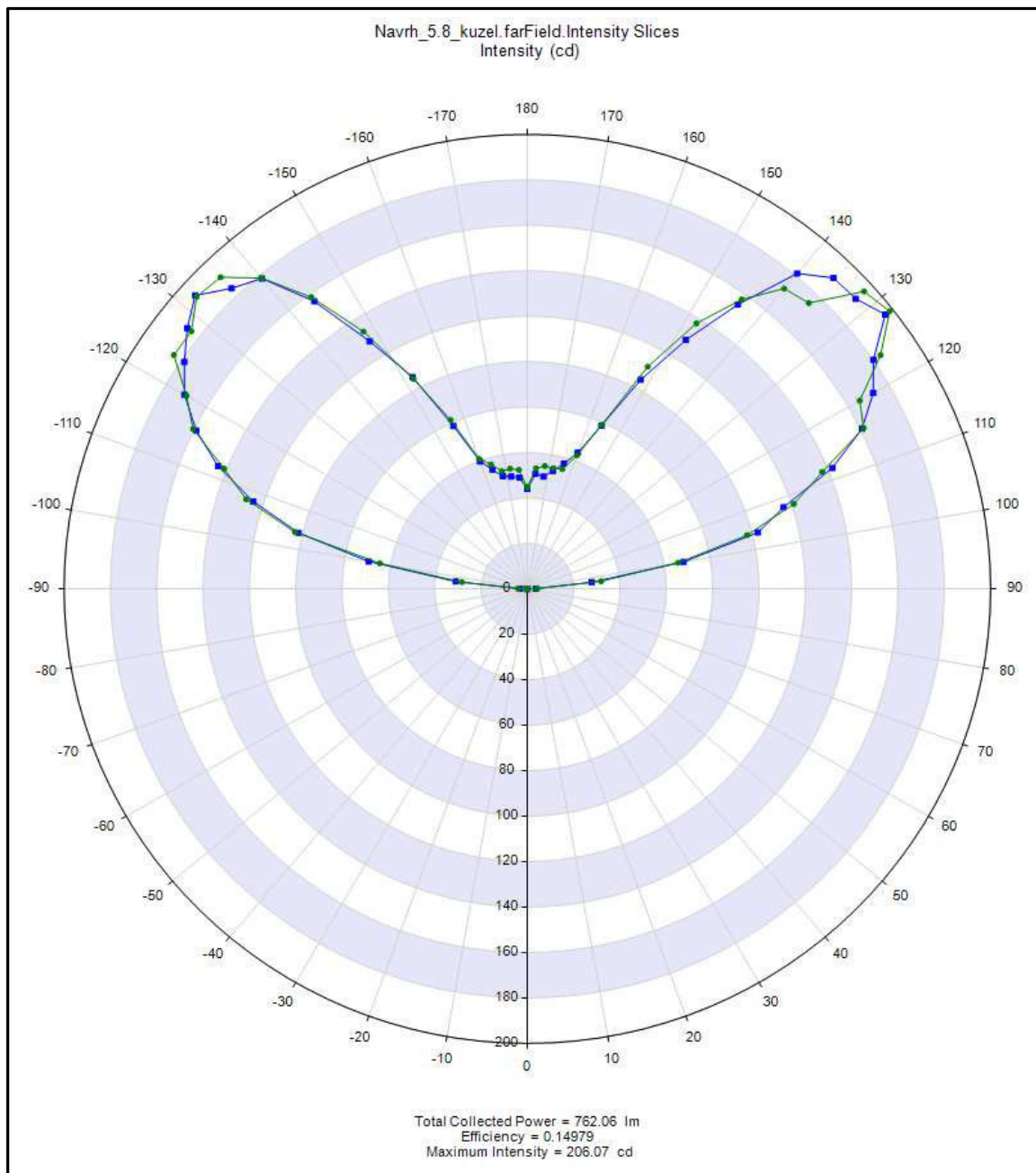
Úkolem této části optického návrhu je dosáhnout požadované distribuce světla z výstupu homogenizéru, který tvoří osvětlení místnosti nepřímým světlem. V první řadě je důležité ponechání prostoru na chladicí soustavu a přidání krycího skla k uzavření prostoru homogenizéru. Volný prostor pro zástavbu chladicí soustavy je zobrazen na obrázku 2.16. Obě krycí skla jsou z totožného materiálu o stejné tloušťce (2 mm) pouze s různými průměry. Opticky účinný povrch chladiče vedoucí mezi DPS a krycím sklem 2 je v simulaci nastaven jako hliník (v knihovně softwaru LightTools optická vlastnost nazývaná „Aluminium“), u kterého se odraznost pohybuje cca od 80 % do 92 % v závislosti na vlnové délce dopadajícího světla a úhlu dopadu paprsku na plochu. Graf této závislosti je uveden v příloze E.



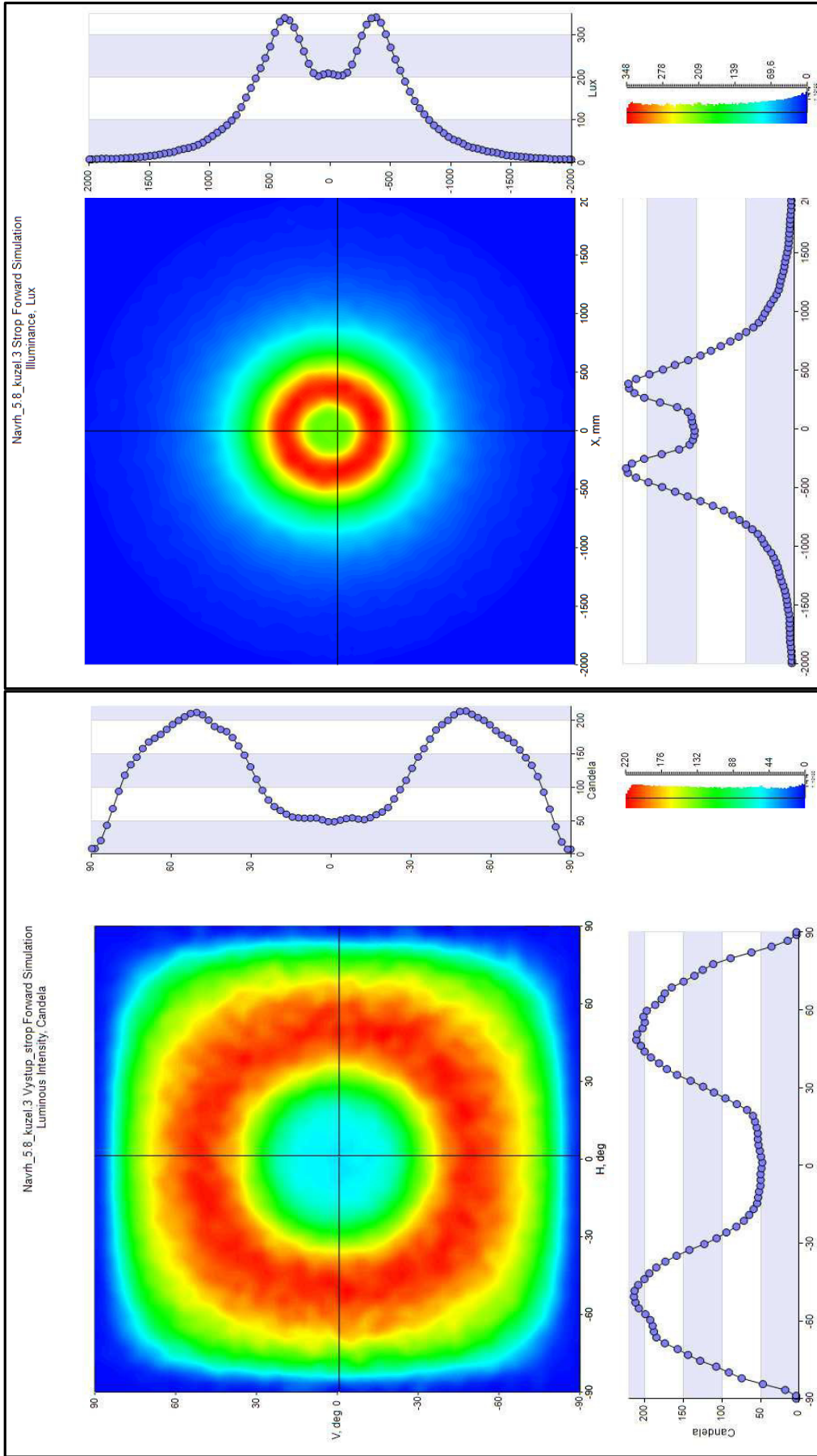
Obrázek 2.16: Schéma optického návrhu uzavřeného homogenizéru: Vyobrazen zejména volný zástavbový prostor pro chladicí soustavu a další krycí sklo.

Parametry simulací pro celou tuto část byly totožné s nastavením z poslední simulace. Ve vzdálenosti 1 mm za výstup homogenizéru do spodního poloprostoru byla vložena v prostředí LightTools opět absorpční deska, která pohltí veškeré světlo dopadající ze svítidla do spodního poloprostoru. Jelikož je předmětem zájmu této části výstup homogenizéru do horního poloprostoru, je vhodnější zobrazovat na detektorech pouze data týkající se tohoto výstupu. Snímací detektor ve

vzdáleném poli navíc díky vložení absorbční desky zobrazuje polární graf s větším rozlišením. Dále byla vložena do vzdálenosti 550 mm od počátku souřadnic homogenizéru ve směru záporné osy z páta detektor reprezentující strop místnosti. Tento plošný detektor kruhového tvaru byla nazvaná v prostředí LightTools jako *Strop*. Velikost jejího průměru je 4 m, rozlišení 100×100 binů (error estimate 13,4 %), jedna buňka má tedy délku strany 40 mm. Výsledky simulace výstupu homogenizéru do horního poloprostoru po přidání zástavbového prostoru pro chladicí soustavu a druhého krycího skla jsou na obrázcích 2.17 a 2.18. Na výsledcích lze pozorovat, že nerovnoměrné rozložení intenzity na výstupu z homogenizéru se zobrazí na strop a tvoří nežádoucí kruh s úbytkem intenzity v jeho středu (obr. 2.18 vpravo). Dále lze pozorovat na detektoru ve vzdáleném poli na obrázku 2.17, že světlo vycházející z homogenizéru se šíří do prostoru v rozmezí úhlu od -100 % do 100 %. Při návrhu by mělo být snahou dosáhnout co největšího rozmezí těchto úhlu, aby byl strop rovnoměrně osvětlen a nevznikaly přesvícená místa.

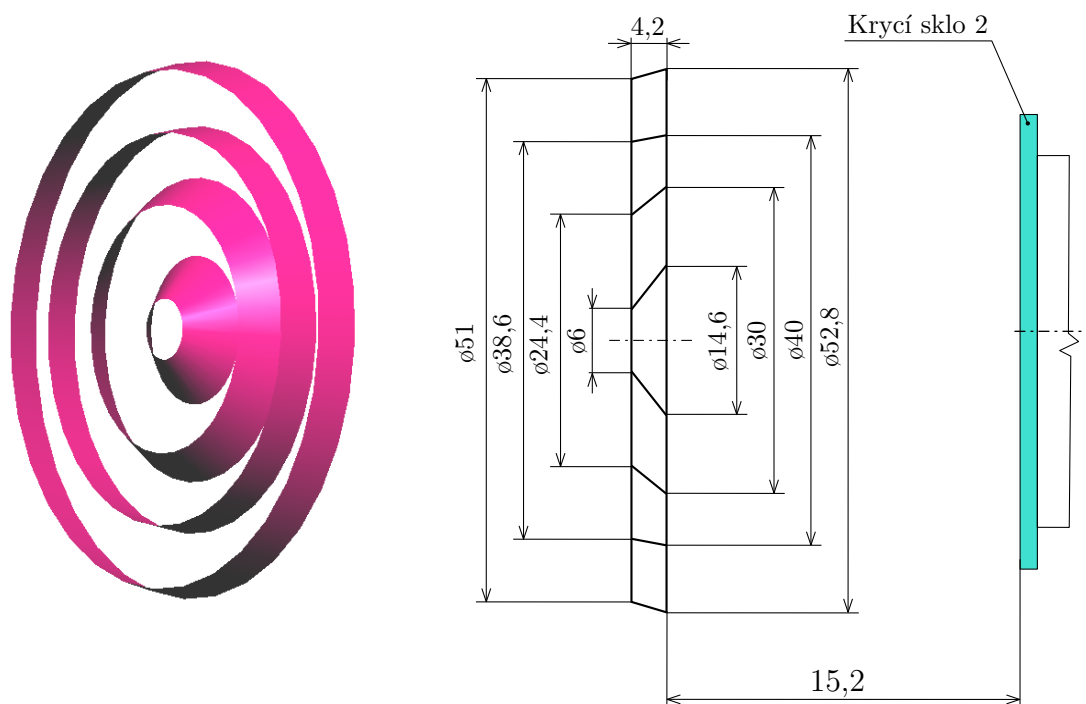


Obrázek 2.17: Homogenizér bez prvku tvarujícího světlo vyzařující do horního poloprostoru: Křivky svítivosti zaznamenány detektorem ve vzdáleném poli.



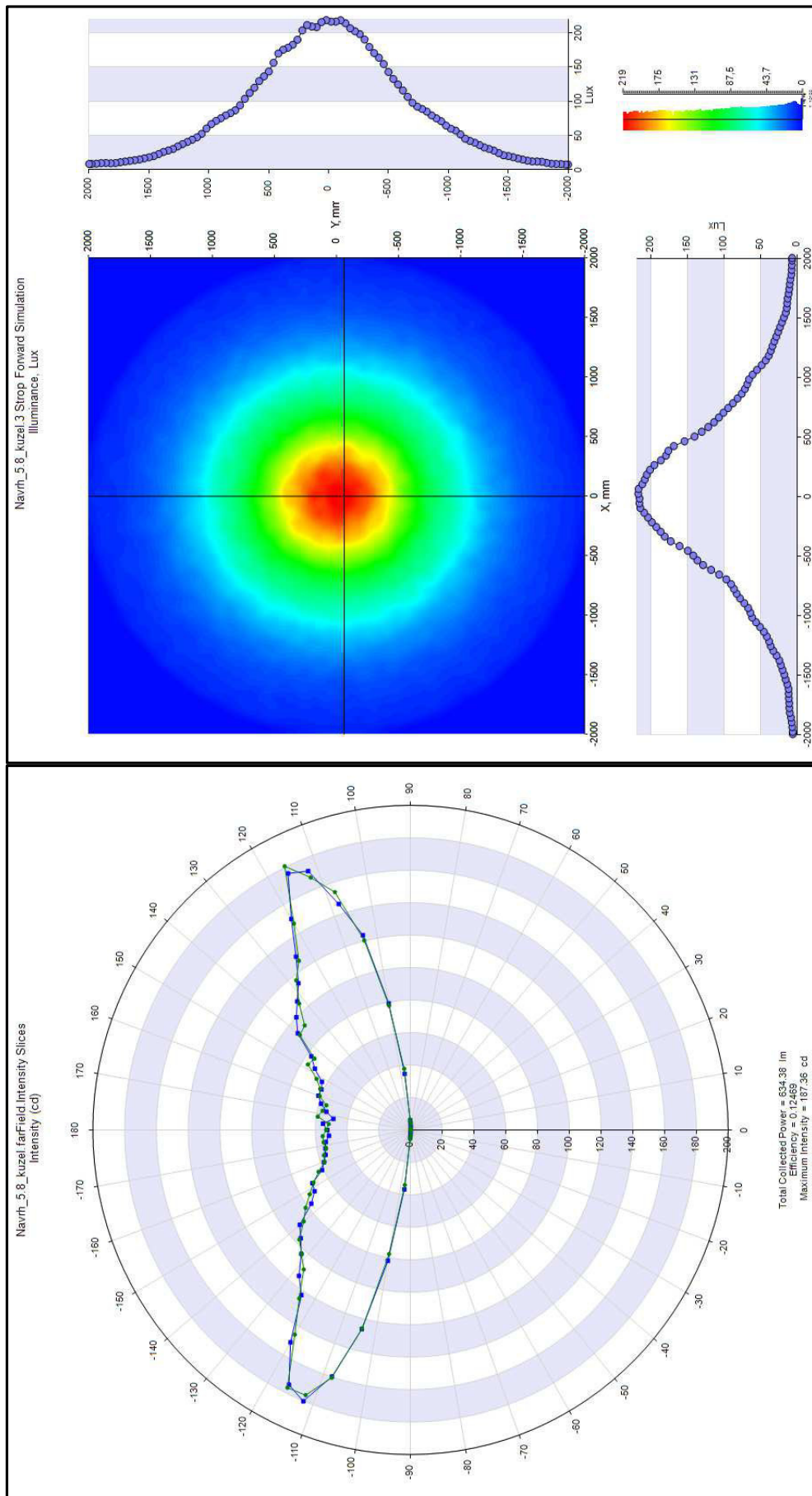
Obrázek 2.18: Homogenizér bez prvku tvarujícího světlo vyzařující do horního poloprostoru: Vlevo detekována nerovnoměrné rozložení intenzita na detektoru *Výstup strop*, což se následně projevív na rovině *Strop* zastupující strop osvětlovaného prostoru.

Během vývoje prvku svítidla tvořící nepřímé světlo, které povede k definovaným cílům návrhu bylo simulováno v softwaru LightTools několik nápadů. Jedním z nich bylo přidání difúzní fólie pod krycí sklo 2 a tím docílení rovnoměrného rozložení intenzity na stropě. Fólie však značně zmenšila velikost světelného kužele a také rozmezí úhlu, pod kterým světlo z homogenizéru vystupuje. Tímto byl sice odstraněn problém s chybějícím světlem ve středu výstupu, ale stále byl na stropě viditelný přechod mezi vyššími a nižšími intenzitami světla, nebo-li ostrý ohraničený světelný kruh. Stejný problém se vyskytoval při návrhu jednoduchého reflektoru uvažovaného v počátku tvorby konceptu (obr. 2.4), který byl tvořen přímo částí chladicí soustavy a jeho účelem bylo doplnit světlo do středu výstupu svítidla na strop místnosti, a tak docílit rovnoměrné osvětlenosti stropu. Výsledným prvkem, který splnil kladené požadavky, je stínící kruh tvořen čtyřmi pruhy do kruhu tvarovaného plechu s definovanými optickými vlastnostmi povrchu. Stínící kruh je znázorněn na obrázku 2.19. Povrch dílu je zvolen opět z knihovny LightTools. Byl vyhledán povrch s velkým podílem difúzního odrazu. Světlo tak bylo odraženo od stínícího kruhu mimo svítidlo, což zapříčinilo jeho rozptýlení, a tím pádem tak nedocházelo k nežadoucím ostrým odrazům. Povrch stínícího kroužku je opatřen hliníkovým povlakem Almecco VEGA 95127 s odrazností nejméně 94 %, z čehož tvoří 92-94 % odraz difúzní. Účinnost celého optického systému je k nahlédnutí v tabulce 2.9. Poměr světelného toku zářícího z výstupu na strop a výstupu na podlahu nebyl zásadně ovlivněn přidáním chladicí soustavy, krycího skla a stínícím kruhem.



Obrázek 2.19: Stínící kruh: Vlevo 3D model z programu LightTools, vpravo schéma s rozměry.

V této fázi návrhu bylo dosaženo všech požadavků stanovených na začátku části 2.4.3, jak lze vidět na obrázku 2.20. Chybí pouze navrhnout poslední část optické soustavy svítidla, která bude tvarovat světelný svazek nasvětlující podlahu místnosti.



Obrázek 2.20: Homogenizér se stínícím kruhem: Z polárního grafu (vlevo) je patrná distribuce světla téměř do všech úhlů horního poloprostoru. Z detekce osvětlenosti na rovině *Strop* je zřejmá rovnoměrně rozložená intenzita dopadajícího světla klesající směrem od středu detektoru (maximum 219lx).

Tabulka 2.9: Přehled poklesu účinnosti systému na jednotlivých prvcích po přidání stínícího kruhu.

Část homogenizéru	Účinnost celého systému
Pouze DPS	100,00 %
+ těleso homogenizéru	88,32 %
+ krycí sklo 1	87,51 %
+ difúzní fólie	79,56 %
+ chladicí soustava	77,69 %
+ krycí sklo 2	77,53 %
+ stínící kruh	76,34 %

2.3.5 Část svítidla tvořící přímé světlo

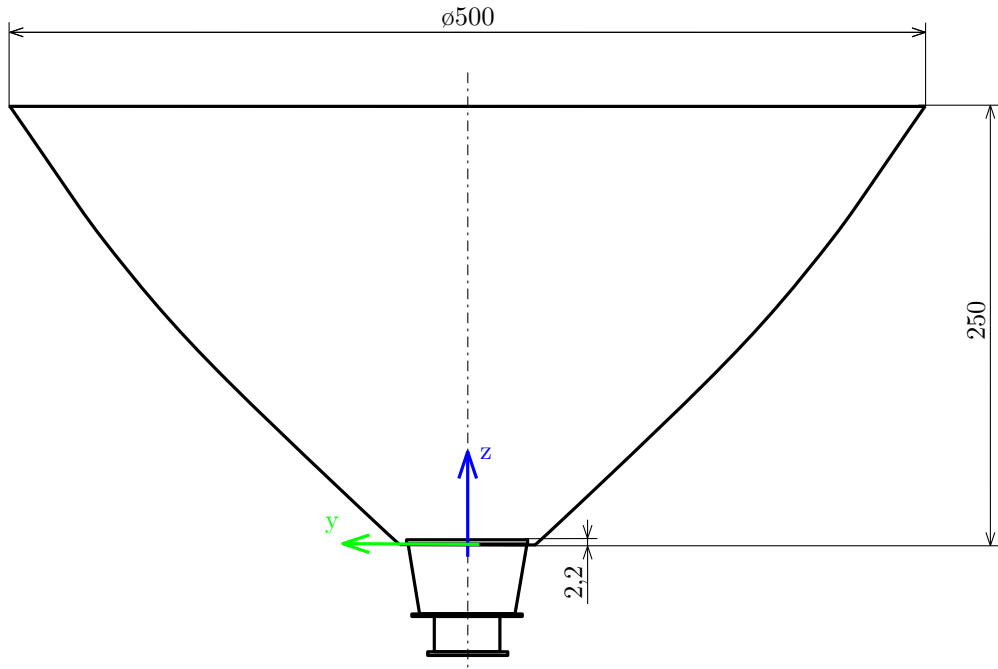
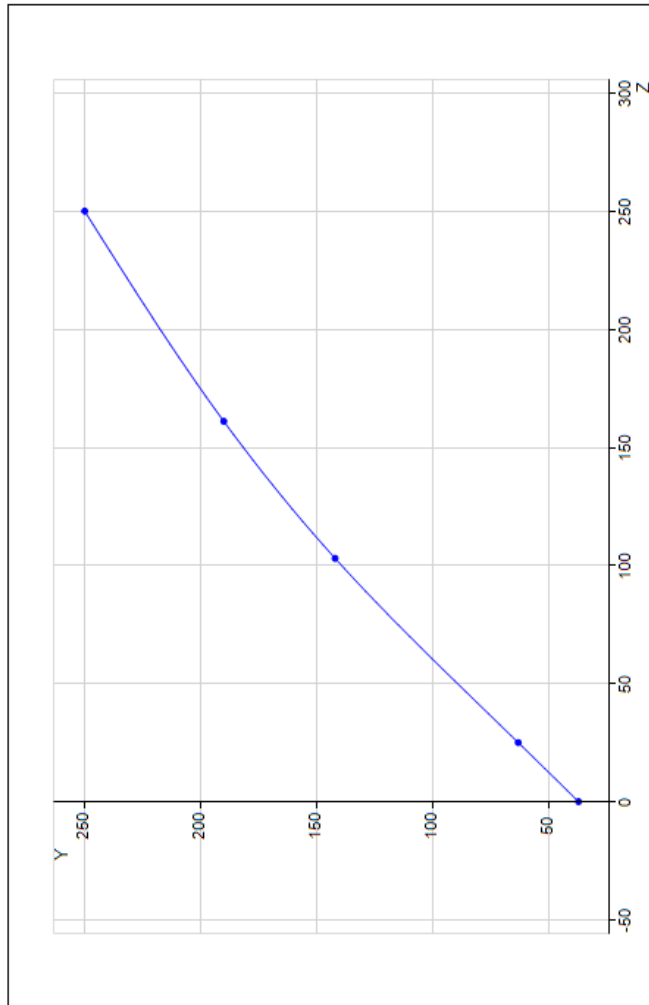
Poslední částí svítidla tvořené v softwaru LightTools je reflektor, jehož účelem je tvarovat výstup světla z homogenizéru do spodního poloprostoru místnosti. Aby bylo možné v simulaci posoudit osvětlenost na podlaze místnosti, kterou bude svítidlo osvětlovat, je přidán poslední plošný detektor nazvaná „Podlaha“. Jedná se o rovinu opět kruhového tvaru o průměru 8 m s rozlišením 100×100 binů (error estimate nabývá hodnoty 20,1 %) umístěnou ve vzdálenosti 2,5 m od krycího skla 1 v kladném směru osy z. Povrch reflektoru byl zvolen takový, aby netvořil příliš ostře ohraničený obraz zdroje na detektoru a zajistil rovnoměrný pokles intenzity od středu výstupu směrem k jeho okrajům. Jedná se o Almecco Sandblast E s odrazností cca 78 %. Samotný reflektor byl tvořen pomocí funkce „SweptSheet“ obsažené v LightTools, která umožňuje rotovat kolem zvolené osy křivku definovanou několika body a tak vytvořit plochu. Pro návrh reflektoru v této práci je použito pět bodů, které jsou proloženy hladkou spline křivkou. Data ke křivce, rozměry a umístění reflektoru jsou zobrazeny na obrázku 2.21. Světelný výstup tvarovaný reflektorem je zobrazen na obrázku 2.22. Na obrázku 2.14 vlevo je pro porovnání zobrazen výstup z homogenizéru bez tohoto optického členu tvarujícího přímé světlo. Návrh reflektoru je zpracován záměrně se snahou o dosažení velkého vnějšího průměru reflektoru. Důvodem je jeden z cílů definovaných v podkapitole 2.1, a to nízká hodnota oslnění osob vyskytujících se v osvětlovaném prostoru. Nízké hodnoty UGR lze dosáhnout pomocí zvyšování velikosti svítící plochy a odstraněním parazitního světla, které dopadá mimo osvětlovanou plochu (podkap. 1.6.4).

Z výsledků simulace provedené se stejnými parametry jako dopsud, lze zhodnotit na obrázku 2.22, že svítidlo bude na podlaze osvětlovat plochu cca o průměru 5,5 m, kdy intenzita osvětlení na ploše klesá rovnoměrně od středu k okrajům, což je dle souběžně prováděné simulace osvětlení prostoru v softwaru Dialux EVO žádoucí. V reálném použití by tak neměly vznikat lidským okem viditelné přechody mezi nižší a vyšší intenzitou světla.

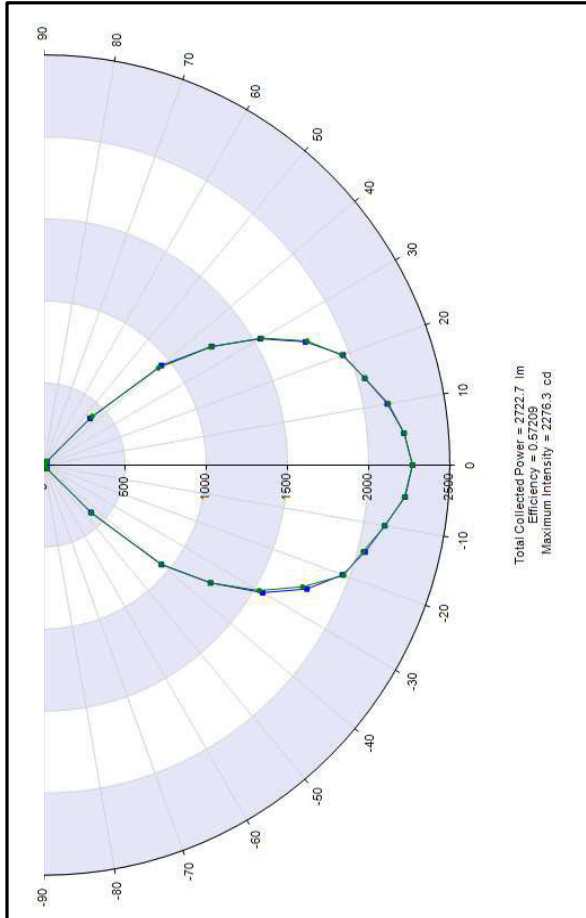
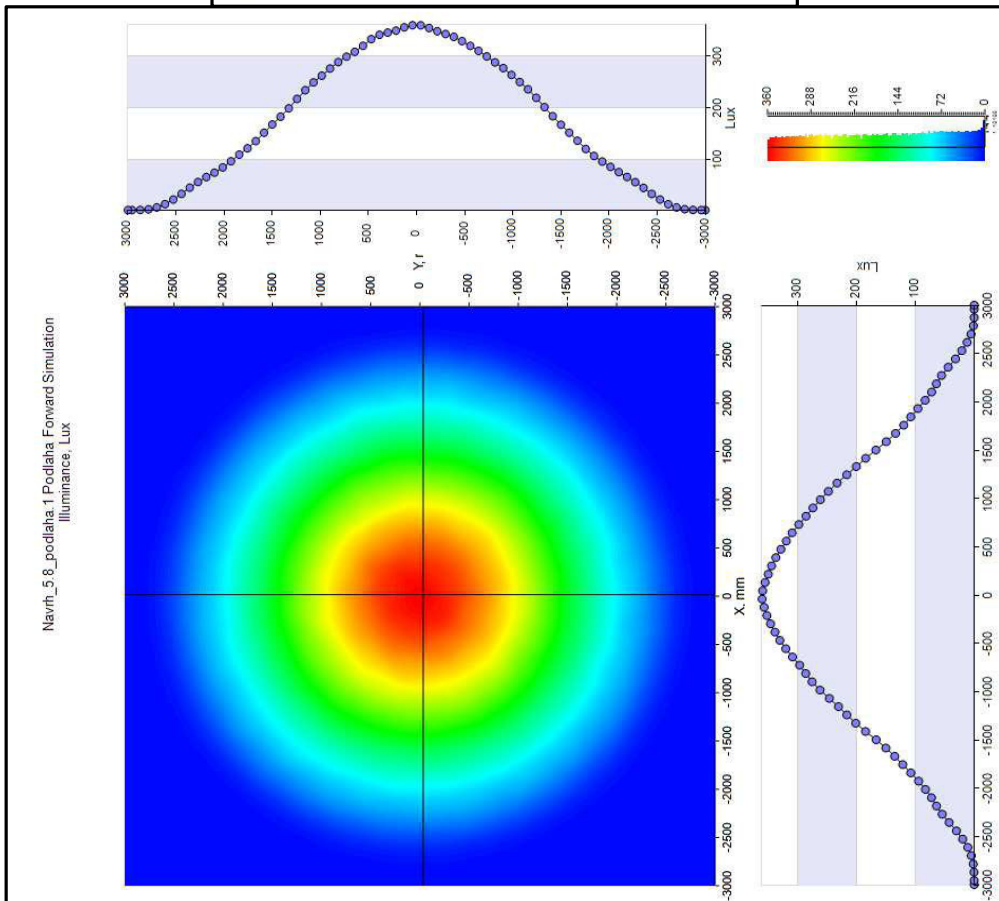
Fitted Curve Tangents Faceting Coordinates Ray Trace Mapping

Number of Points

	Z	Y
1	0.00000	37.000
2	25.000	63.000
3	103.00	142.00
4	161.00	190.00
5	250.00	250.00
End of Data		



Obrázek 2.21: Reflektor: Velvo zobrazeno prostředím nástroje „SweepSheet“. Vpravo je schématický boční pohled s rozměry reflektoru.



Obrázek 2.22: Homogenizér s reflektorem tvarujícím světlo vyzářující do dolního poloprostoru: Detektor *Podlaha* (vlevo) je rovnoměrně osvětlen s poklesem intenzity od středu ke krajům (maximum 360lx). Polární graf zobrazuje poloviční úhel FWHM 75°. Polární graf zobrazuje poloviční úhel FWHM 75° téměř bez parazitního světla.

2.3.6 Finální návrh

V této části bude představen optický návrh svítidla jako celek a vyzdviženy jeho výhody. Na obrázku 2.23 je zobrazen 3D model opticky účinných částí svítidla v prostředí softwaru LightTools, který je následně přiložen v této práci na CD. Vedle 3D modelu je boční schématicky pohled se základními rozměry celého optického návrhu. Finální návrh reprezentuje závěsné svítidlo poskytující smíšené osvětlení prostoru s následujícími parametry:

Typ svítidla:	závěsné, smíšené
Délka závěsu:	0,5 m
Typ zdroje:	LED Osram Oslon SLL 150 RGBW
Příkon zdroje:	75 W
Světelný tok svítidla:	3200 lm
Účinnost svítidla:	67 %
Teplota chromatičnosti:	3000–5000 K
Vyzařovací úhel:	75°
Index podání barev (R_a):	> 90
Doporučená montážní výška:	2,5 m

Aby bylo dosaženo přesnějších výsledků simulace finálního návrhu, byl nastaven celkový počet trasovaných paprsků na 33 600 000 se zachováním nastavení ostatních parametrů z předchozí simulace. Na obrázku 2.24 je vyobrazen symetrický polární graf svítivosti zaznamenaný detektorem ve vzdáleném poli. Do spodního poloprostoru vyzařuje svítidlo cca 83 % svého světelného toku jako přímou složku smíšeného osvětlení. Zbytek energie osvětluje strop místnosti a reprezentuje nepřímou složku osvětlení. Takto vyvážené rozdělení světelného toku zajistí rovnoměrnou osvětlenost prostoru, sníží množství tmavých stínů a velkých kontrastů jasů, čímž bude celý osvětlovaný prostor pro člověka pohodlnější. Bude docházet k lepšímu vizuálnímu vjemu lidského oka a zlepší se světelná pohoda tohoto prostředí. Poměr světelného toku dopadlého ze svítidla na detektor *Strop* a *Podlaha* a pokles účinnosti na jednotlivých dílech svítidla je uveden v tabulce 2.10. Je důležité vyzdvihnout, že optický návrh má poměrně vysokou hodnotu účinnosti (67,4 %), což bývá častým problémem při návrhu svítidel se zdrojem obsahujícím barevné diody RGBW. Do střetu se dostává barevá homogenita výstupu z homogenizéru s jeho účinností. Při návrhu bylo proto nutné volit kompromis mezi účinností a barevnou homogenitou obou výstupů, který byl nalezen na délce tělesa homogenizéru 40 mm.

Obrázek 2.25 zobrazuje intenzitu osvětlení detektorů *Podlaha* a *Strop* místnosti v šedých barvách. Opět je na rovinách potvrzeno, že bylo při návrhu svítidla dosaženo rovnoměrného poklesu intenzity od středu k okrajům světelného výstupu. Svítidlo by tak nemělo tvořit na stropu nebo podlaze osvětlovaného prostoru nežádoucí a lidským okem pozorovatelné ostré kontrasty jasů povrchu, obrazce nebo intenzitní propady. Při sloučení několika svítidel tohoto typu do osvětlovací soustavy by měla být dosažena jak rovnoměrná osvětlenost celého prostoru, tak plnění zákonných požadavků rovnoměrnosti.

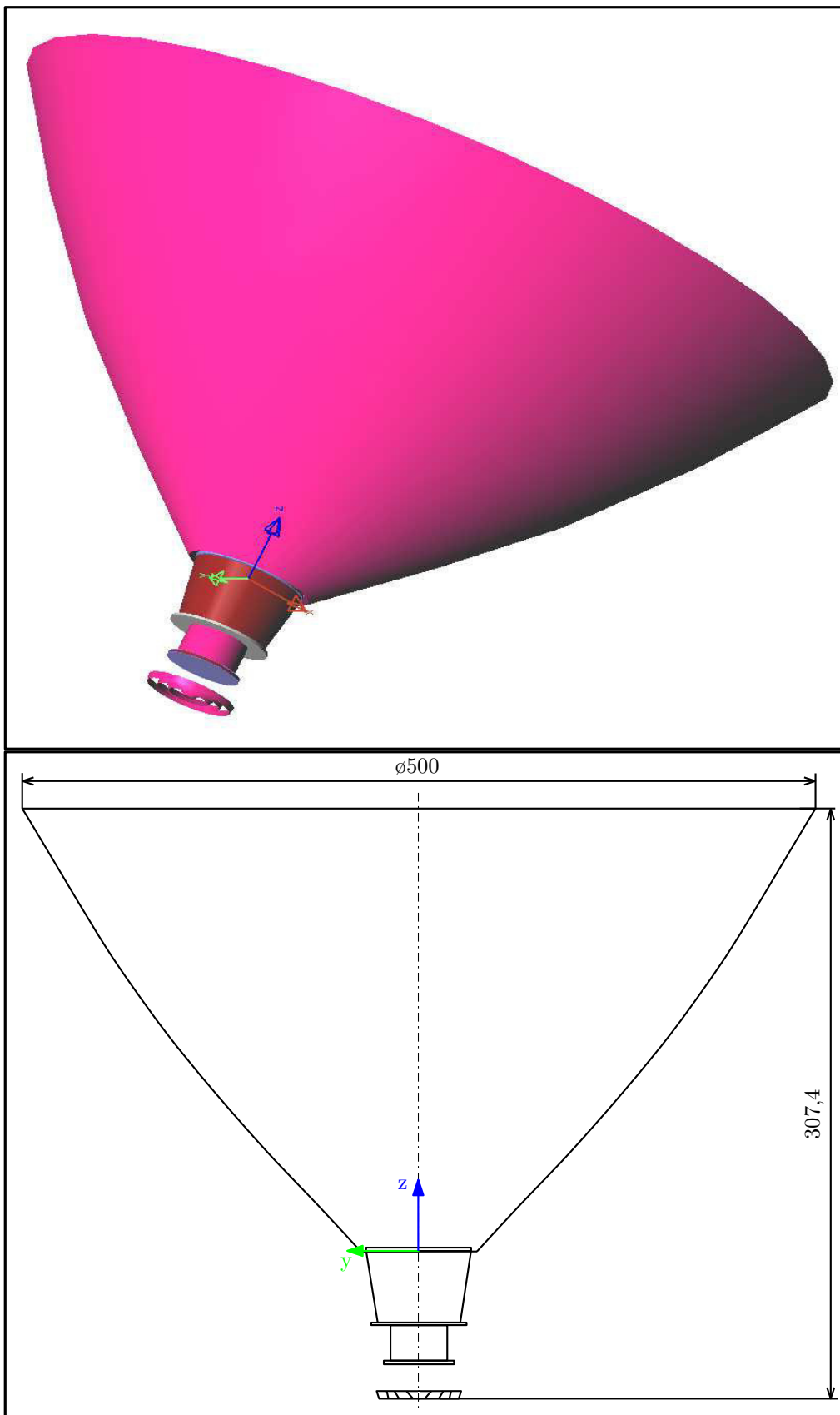
Na stropě vytváří svítidlo kruh o průměru cca 4 m s maximální hodnotou intenzity ve středu kruhu 196 lx. Podlaha místnosti je osvětlena tak, že při umístění pouze jednoho svítidla do prostoru na ní, vznikne kruh o průměru cca 5,5 m s maximální středovou osvětleností 326 lx. Osvětlení takto velké plochy prostoru přináší zásadní výhodu v počtu svítidel potřebných pro jeho osvětlení. Čím větší plochu bude jedno svítidlo osvětlovat, tím méně je potřeba svítidel k osvětlení celého prostoru. To se následně projeví ve snížení pořizovací ceny celého osvětlení.

Na dalším obrázku 2.26 je zobrazena barevná homogenita světelného výstupu z obou částí svítidla. Nejsou zde viditelné žádné barevné rozdíly (nehomogenita) a výstup je zcela vyhovující. Při řízení zdroje svítidla by tak nemělo docházet k viditelným barevným rozdílům a vyzařující světlo by mělo být měkké, homogenní a v každém směru co nejvíce spektrálně shodné. Svou konstrukcí plní optický návrh zákonný požadavek normy ČSN EN 12464–1 minimálního úhlu clonění světelného zdroje, který nabývá hodnoty 47 °.

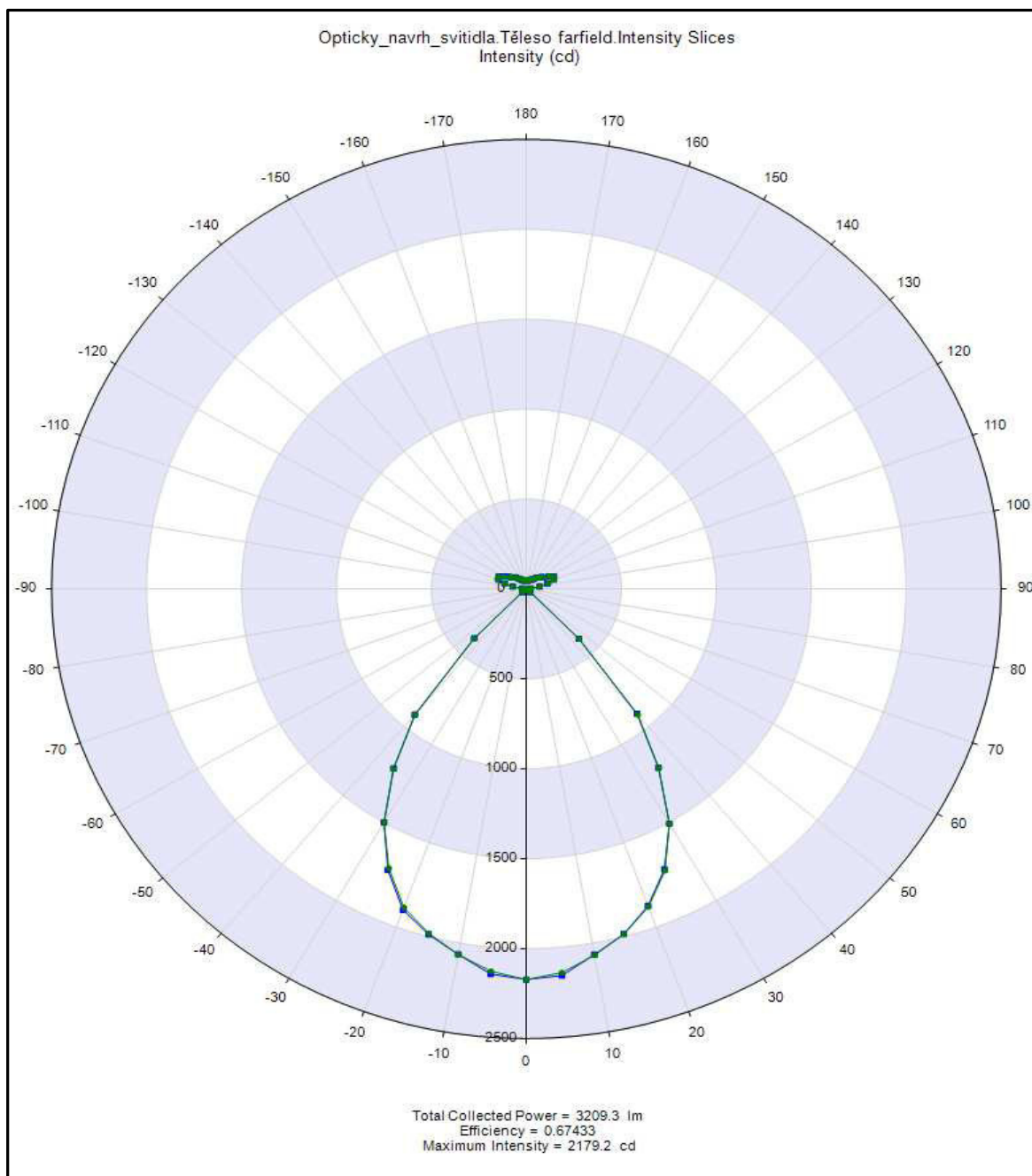
Tabulka 2.10: Přehled poklesu účinnosti systému na jednotlivých prvcích finálního návrhu svítidla.

Část homogenizéru	Účinnost celého systému
Pouze DPS	100,00 %
+ těleso homogenizéru	88,32 %
+ krycí sklo 1	87,51 %
+ difúzní fólie	79,56 %
+ chladicí soustava	77,69 %
+ krycí sklo 2	77,53 %
+ stínící kruh	76,34 %
+ reflektor	67,41 %
Detektor Strop → 17,3 ^a % (celkem 555 lm)	
Detektor Podlaha → 82,7 ^a % (celkem 2645 lm)	

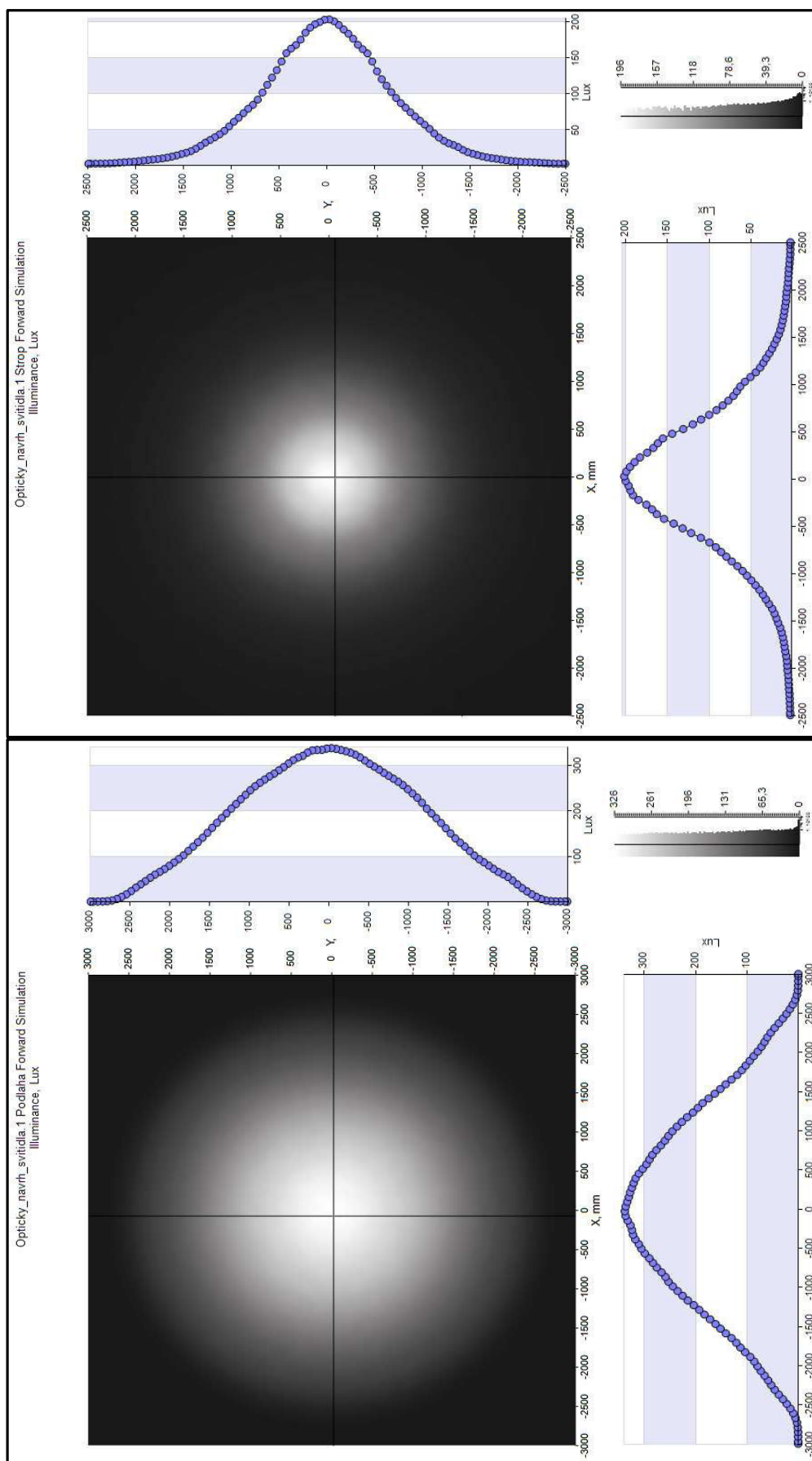
^aMnožství energie v % vyzářené z jednoho výstupu vztahované k celkovému vystupujícímu toku z homogenizéru



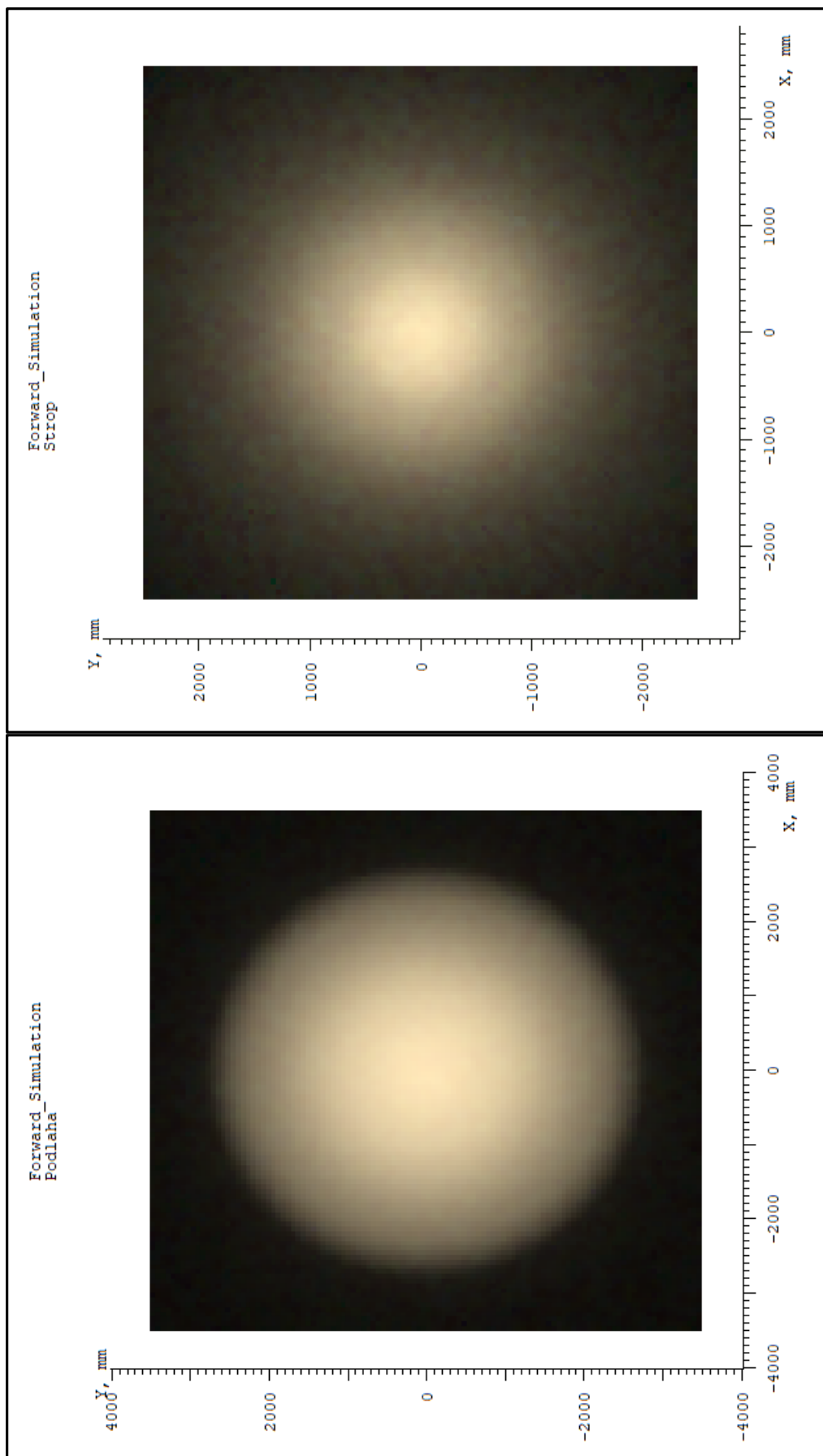
Obrázek 2.23: Finální návrh: Vlevo vyobrazen boční schématický pohled na celou optickou soustavu. Vpravo se nachází obrázek 3D modelu optického systému v softwaru LightTools.



Obrázek 2.24: Finální návrh: Polární graf svítidla v trendu HCL zobrazený na detektoru ve vzdáleném poli.



Obrázek 2.25: Finální návrh: Osvětlenost a její rozložení na konkrétních plochách pomocí rovinných detektorů *Podlaha* (vlevo) a *Strop* (vpravo).



Obrázek 2.26: Finální návrh: Barevná homogenita na konkrétních plochách pomocí rovinných detektorů *Podlaha* (vlevo) a *Strop* (vpravo).

3 NÁVRH VYUŽITÍ SVÍTIDLA V INTERIÉRU

Za účelem ověření funkčnosti svítidla navrženého v kapitole 2, je vytvořen návrh osvětlení v softwaru Dialux EVO. Příkladem osvětlení, kde bude svítidlo aplikováno, a bude vytvořena i celá osvětlovací soustava je mateřská škola. Jedná se o prostory s déle trvajícím výskytem osob pod umělým osvětlením, ve kterých je dle [51] silně doporučováno používat dynamické osvětlení s ohledem na vliv světla na člověka. Vytvořený návrh mateřské školy je zcela smyšlený autorem této práce. Pro názornost a ověření funkčnosti svítidla je však plně dostačující.

3.1 Normativní požadavky na osvětlení v mateřských školách

Úkolem této podkapitoly je stručně uvést několik zákonných požadavků, které by měla osvětlovací soustava a návrh osvětlení mateřské školy splňovat. Při návrhu osvětlovací soustavy byl kladen důraz zejména na tyto tři dokumenty:

1. ČSN EN 12464–1 Světlo a osvětlení–Osvětlení pracovních prostorů–Část 1: Vnitřní pracovní prostory.
2. Vyhláška 410/2005 Sb., o hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých
3. Vyhláška 343/2009 Sb., kterou se mění vyhláška č. 410/2005 Sb., o hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých

Tyto normativní dokumenty obsahují zákonné požadavky, jako například:

- Při osvětlenosti místa zrakového úkolu musí dosahovat střední hodnota osvětlenosti minimálně 500 lx na této ploše, oblast bezprostředního okolí úkolu min. 300 lx s rovnoměrností osvětlení $U_0 \geq 0,40$, pozadí úkolu musí splňovat podmínku $U_0 \geq 0,10$ [34].
- Doporučená hodnota činitele odrazu je pro podlahu 0,2–0,4; stěny 0,5–0,8 a strop 0,7–0,9 [34].
- Velké jasy mají být vyloučeny pro směry pohledu zdola použitím rozptylných krytů [34].
- Barevný tón umělého světla volit pro hodnoty $\overline{E}_m \leq 200 \text{ lx}$ teple bílý; $200 \text{ lx} < \overline{E}_m \leq 1000 \text{ lx}$ neutrálně bílý; $\overline{E}_m > 1000 \text{ lx}$ chladně bílý podle normových požadavků 14).
- V ložnicích ubytovacích zařízení musí denní osvětlení vyhovovat normovým hodnotám pro obytné místnosti 12). Celkové umělé osvětlení v ničem necloněné srovnávací rovině v úrovni podlahy musí mít $E_m = 100 \text{ lx}$. Svítidla místního osvětlení musí být polohovatelná tak, aby se osvětlení dalo přizpůsobit zrakovým potřebám uživatelů a zajistila se osvětlenost $E_m = 300 \text{ lx}$.
- Výška horizontálních srovnávacích rovin pro návrh a posouzení osvětlení místa zrakového úkolu u umělého osvětlení v zařízeních pro výchovu a vzdělávání a provozovnách pro výchovu a vzdělávání pro děti předškolního věku je 0,45 m nad podlahou.

Norma ČSN EN 12464–1 udává tabulku požadovaných hodnot osvětlenosti, její rovnoměrnosti, indexu oslnění a indexu podání barev určenou pro předškolní zařízení:

Tabulka 3.1: ČSN EN 12464-1: Vzdělávací zařízení–Mateřské školy a jesle [34].

Druh prostoru, úkolu nebo činnosti	$\overline{E_m}[lx]$	UGR_L	U_0	R_a
místnost pro dětské hry	300	22	0,4	80
dětské pokoje	300	22	0,4	80
místnost pro ruční práce	300	19	0,6	80

3.2 Simulace osvětlení v softwaru Dialux Evo

Tvorba simulace osvětlení předškolního zařízení probíhala současně s návrhem svítidla v trendu HCL v kapitole 2. Navržené svítidlo je tak vytvořeno k aplikaci nejlépe na tento typ osvětlovaných prostorů. Pokud by se změnila například délka závěsu svítidla, výška místnosti nebo druh osvětlovaného prostoru a tím zákonné požadavky, bylo by nutné funkčnost celého návrhu opět ověřit pomocí simulace osvětlení. Pak je v případě jakýkoliv nedostatků možné změnit spektrální řízení svítidla nebo vyzařovací charakteristiku pomocí změny optických prvků svítidla. Pokud byl například požadován větší světelný tok svítidla, je možné ho získat změnou řízení R, G, B kanálu zdroje svítidla. Jelikož v současném návrhu jsou tyto kanály využívány pouze na 10–15 % možného maximálního toku, vzniká zde nevyužitá část kapacity světelného zdroje (část 2.2.3). U svítidla navrženého v této práci by však vedlo zvyšování světelného toku zdroje ke snížení kvality světla a změně jeho vlivu na psychologické a fyziologické procesy v lidském těle. Proto je nutné přistupovat k této problematice uvážlivě a klást důraz zejména na definici požadavků a cílů, které by mělo osvětlení splňovat.

Stručný popis

Smyslený návrh mateřské školy zahrnuje dvě místnosti. První místnosti je „Herna“, která slouží jako hlavní prostor pro většinu činností běžně probíhajících v předškolním zařízení, kromě spánku a odpočinku. K tomu je určen druhý prostor pojmenovaný v prostředí softwaru jako „Oddechová místnost“. Rozměry obou prostorů byly voleny náhodně. Jejich výška je 3,1 m, což může být považováno za běžnou výšku patra budovy. Do dvou rohů místnosti bylo vloženo několik různě vysokých stolů a židlí. Pro místo zrakového úkonu na těchto plochách, bezprostředního okolí úkonu a pro pozadí úkonu byly vytvořeny sítě kontrolních bodů. Ty sloužily k výpočtu a kontrole hodnot osvětlenosti dle ČSN EN 12 464–1. Odraznosti jednotlivých ploch obou místností byly zvoleny z knihovny programu Dialux EVO. Herna má odraznost podlahy 55 %, stropu 90 % a stěny místnosti mají stupeň odrazu 86 % a 65 %. Je důležité zanechat barvu stropu osvětlované místnosti vždy bílou s vysokým stupněm odraznosti, aby tak docházelo k difúznímu odrazu nepřímého světla a dobré osvětlenosti místnosti. Oddechová místnost odráží světlo dopadající na podlahu se stupněm odrazu 4 %. Stěny Oddechové místnosti mají jednotný stupeň odrazu 70 % a strop stejně jako Herna 90 % (bílá omítka). Jako vstupní data pro simulaci byl použit formát souboru známý pod označením EULUMDAT s koncovkou .ldt, který lze velmi jednoduše exportovat ze softwaru LightTools. Datový formát obsahuje kromě jiného i křivky svítivosti navrhovaného svítidla a lze proto použít do simulace jako zjednodušený světelný zdroj. Pro účely porovnání a ověření funkčnosti návrhu svítidla v trendu HCL je dostačující tento datový formát souboru pro teplotu chromatičnosti 5000 K a 3000 K. Oba jsou k této práci přiloženy spolu s návrhem osvětlení na CD.

Udržovací činitel

Všechny osvětlovací soustavy se od okamžiku uvedení do provozu postupně znehodnocují. Ztráty jsou způsobeny znečišťováním svítidla nebo také stárnutím světelných zdrojů a svítidla. Pokud není tento jev brán v úvahu, osvětlenost klesne a soustava se stane energeticky neúčinnou a nebezpečnou. Ztrátu světelného toku v čase je nutné odhadnout už ve fázi navrhování soustavy a do výpočtu zahrnout tuto opravu ve formě udržovacího činitele, který je závislý na typu soustavy, prostředí a plánu údržby. Udržovací činitel vnitřní osvětlovací soustavy se běžně počítá dle TNI 36 0451 (CIE 97:2005). Pro soustavy se světelnými diodami (LED) nejsou v TNI 36 0451 dostupná žádná data [67]. Výpočet udržovacího činitele byl tedy v této práci proveden za pomoci kalkulátoru dostupného online na <http://www.svetloblog.cz>. Zadané parametry jsou uvedeny v tabulce 3.2, kde je výsledná hodnota udržovacího činitele rovna 0,77.

Tabulka 3.2: Výpočet udržovacího činitele vnitřní osvětlovací soustavy MF [67].

Zadané parametry:	
Typ svítidla:	otevřené svítidlo bez horního krytu
Vyzařování:	přímo–nepřímé
Typ světelného zdroje:	LED či vlastní zadání LLMF/LSF
Počet provozních hodin:	1 140 h/rok (vzdělávací zařízení)
Kategorie znečištění:	čistě
Činitelé odrazu (strop / stěny / podlaha):	0,80 / 0,70 / 0,20
Interval skupinové výměny světelných zdrojů:	LED či vlastní zadání LLMF/LSF
Individuální výměna vyhořelých zdrojů:	LED či vlastní zadání LLMF/LSF
Interval čištění svítidel a povrchů místnosti:	0,5 roku
Volitelné zadání:	
Činitel stárnutí světelného zdroje (LLMF):	0,90
Vypočtené parametry:	
Doba svícení do skupinové výměny:	LED či vlastní zadání LLMF/LSF
Průměrná doba života světelného zdroje:	70 000 hodin
Průměrná doba do výměny světelných zdrojů (svítidel):	61,4 roky
Činitel funkční spolehlivosti světelných zdrojů (LSF):	1,00
Udržovací činitel svítidla (LMF):	0,95
Udržovací činitel povrchů (RSMF):	0,90
Udržovací činitel (MF):	0,77

Výsledky

Podrobná zpráva (ve formátu dokumentu PDF) s výsledky návrhu osvětlení a jeho funkčnosti je přiložena k diplomové práci na CD. V této podkapitole bude ke znázornění funkčnosti návrhu svítidla a plnění zákonných požadavků použit přehled výsledků, který poskytuje prostředí softwaru Dialux EVO. Analýza byla provedena na krajních hodnotách nastavení zdroje svítidla. Na obrázcích 3.1 a 3.2 jsou zobrazeny výsledky dosažené při nejvyšších hodnotách $T_{CH} = 5000$ K a světelného toku na zdroji $\Phi = 3190$ lm, které byly definovány v části 2.2.3, zabývající se řízením světelného zdroje svítidla. Obrázky 3.3 a 3.4 zobrazují přehled výsledků naopak pro nastavení svítidla na $T_{CH} = 3000$ K a $\Phi = 1779$ lm na zdroji.

Přehled výsledků			
Hledat			
Dětský stůl 1 - osvětlenost			
603 lx	0.99		
576 lx	0.88		
490 lx	0.36		
Dětský stůl 2 - osvětlenost			
601 lx	0.98		
582 lx	0.92		
492 lx	0.35		
Dětský stůl 3 - osvětlenost			
600 lx	0.98		
601 lx	0.96		
491 lx	0.35		
Dětský stůl 4 - osvětlenost			
586 lx	0.99		
568 lx	0.95		
493 lx	0.35		
Dětský stůl 5 - osvětlenost			
619 lx	0.99		
611 lx	0.94		
492 lx	0.35		
Dětský stůl 6 - osvětlenost			
598 lx	0.99		
583 lx	0.91		
490 lx	0.36		
Herna - osvětlenost (0,45m)			
561 lx	0.46		
Herna - osvětlenost (stěny a strop)			
277 lx	0.55		
228 lx	0.45		
243 lx	0.54		
253 lx	0.66		
262 lx	0.80		
232 lx	0.44		
243 lx	0.42		
Herna - UGR (0,45m)			
13.2	< 10		
Herna - UGR (1,08m)			
11.8	< 10		
Stůl 1 - osvětlenost			
610 lx	0.97		
564 lx	0.85		
495 lx	0.35		
Stůl 2 - osvětlenost			
564 lx	0.93		
520 lx	0.78		
497 lx	0.35		
Stůl 3 - osvětlenost			
536 lx	0.93		
478 lx	0.72		
501 lx	0.35		
Stůl 4 - osvětlenost			
602 lx	0.84		
544 lx	0.69		
498 lx	0.50		

Obrázek 3.1: Dialux EVO–přehled výsledků místnosti Herna pro 5000 K: Každá srovnávací rovina je pojmenována podle umístění a veličiny, kterou na ní hodnotíme. U každé roviny pak sloupec vlevo zobrazuje střední hodnotu osvětlenosti v jednotkách lx. Vpravo je vyobrazena rovnoměrnost osvětlení, která jednotku nemá. Zelený čtverec zcela vpravo značí plnění zákonných požadavků pro mateřské školy. Červená barva tohoto znaku vyjadřuje opak.

Přehled výsledků

Hledat

Oddechová místnost - osvětlenost (0,45m)				
437 lx	0.63			
Oddechová místnost - osvětlenost (stěny a strop)				
139 lx	0.86			
141 lx	0.59			
133 lx	0.61			
133 lx	0.61			
133 lx	0.61			
135 lx	0.60			
Oddechová místnost - UGR (0,45m)				
12.8	< 10			
Oddechová místnost - UGR(1,08m)				
13.8	< 10			

Obrázek 3.2: Dialux EVO–přehled výsledků Oddechové místnosti pro 5000 K: Každá srovnávací rovina je pojmenována podle umístění a veličiny, kterou na ní hodnotíme. U každé roviny pak sloupec vlevo zobrazuje střední hodnotu osvětlenosti v jednotkách lx. Vpravo je vyobrazena rovnoměrnost osvětlení, která jednotku nemá. Zelený čtverec zcela vpravo značí plnění zákonných požadavků pro mateřské školy. Červená barva tohoto znaku vyjadřuje opak.

Přehled výsledků			
Hledat			
Dětský stůl 1 - osvětlenost			
334 lx	0.99		
321 lx	0.88		
274 lx	0.36		
Dětský stůl 2 - osvětlenost			
335 lx	0.99		
326 lx	0.94		
274 lx	0.36		
Dětský stůl 3 - osvětlenost			
335 lx	0.97		
336 lx	0.96		
274 lx	0.36		
Dětský stůl 4 - osvětlenost			
326 lx	1.00		
318 lx	0.95		
275 lx	0.35		
Dětský stůl 5 - osvětlenost			
345 lx	0.98		
341 lx	0.94		
275 lx	0.35		
Dětský stůl 6 - osvětlenost			
335 lx	0.99		
324 lx	0.91		
273 lx	0.36		
Herna - osvětlenost (0,45m)			
313 lx	0.46		
Herna - osvětlenost (stěny a strop)			
155 lx	0.55		
128 lx	0.45		
136 lx	0.54		
141 lx	0.67		
146 lx	0.80		
130 lx	0.44		
136 lx	0.42		
Herna - UGR (0,45m)			
11.1	< 10		
Herna - UGR (1,08m)			
< 10	< 10		
Stůl 1 - osvětlenost			
340 lx	0.97		
315 lx	0.86		
276 lx	0.35		
Stůl 2 - osvětlenost			
316 lx	0.93		
291 lx	0.78		
277 lx	0.35		
Stůl 3 - osvětlenost			
300 lx	0.94		
267 lx	0.72		
279 lx	0.35		
Stůl 4 - osvětlenost			
337 lx	0.85		
305 lx	0.70		
278 lx	0.50		

Obrázek 3.3: Dialux EVO–přehled výsledků místnosti Herna pro 3000 K: Každá srovnávací rovina je pojmenována podle umístění a veličiny, kterou na ní hodnotíme. U každé roviny pak sloupec vlevo zobrazuje střední hodnotu osvětlenosti v jednotkách lx. Vpravo je vyobrazena rovnoměrnost osvětlení, která jednotku nemá. Zelený čtverec zcela vpravo značí plnění zákonných požadavků pro mateřské školy. Červená barva tohoto znaku vyjadřuje opak.

Přehled výsledků

Hledat

Oddechová místnost - osvětlenost (0,45m)	243 lx	0.63		
Oddechová místnost - osvětlenost (stěny a strop)				
	77.4 lx	0.86		
	78.4 lx	0.59		
	74.4 lx	0.60		
	73.7 lx	0.61		
	74.4 lx	0.60		
	75.0 lx	0.59		
Oddechová místnost - UGR (0,45m)				
	10.7	< 10		
Oddechová místnost - UGR(1,08m)				
	11.8	< 10		

Obrázek 3.4: Dialux EVO–přehled výsledků Oddechové místnosti pro 3000 K: Každá srovnávací rovina je pojmenována podle umístění a veličiny, kterou na ní hodnotíme. U každé roviny pak sloupec vlevo zobrazuje střední hodnotu osvětlenosti v jednotkách lx. Vpravo je vyobrazena rovnoměrnost osvětlení, která jednotku nemá. Zelený čtverec zcela vpravo značí plnění zákonných požadavků pro mateřské školy. Červená barva tohoto znaku vyjadřuje opak.

Na výše zobrazených výsledcích je téměř ve všech případech zobrazen zelený symbol značící plnění zákonných požadavků. Na místech zřetelného úkonu (stolech) lze pozorovat rovnoměrnost osvětlení blízkou číslu 1, které značí ideální případ rozložení intenzity na ploše. Intenzita osvětlení na všech těchto plochách převyšuje hodnotu 500 lx, která je požadována. Při hodnocení výsledků nejdůležitější plochy návrhu, srovnávací roviny „Herna–osvětlenost (0,45 m)“, převyšuje osvětlenost plochy, její rovnoměrnost a index UGR minimální požadované hodnoty, které jsou určeny tabulkou 3.1. Dále lze pozorovat velmi nízkou hodnotu indexu oslnění UGR, na kterou byl kladen značný důraz během návrhu svítidla. Maximální hodnoty nabývá index UGR v Oddechové místnosti na rovině ve výšce 1,08 m při největší hodnotě světelného toku zdroje (nastavení 5000 K). Hodnoty teploty chromatičnosti 5000 K však nabývá osvětlovací soustava pouze na krátký okamžik v čase největší aktivity, v kterém by se v Oddechové místnosti neměl nikdo pohybovat. Naopak při hodnotě minimálního světelného toku svítidla (nastavení 3000 K) je celý prostor mateřské školy téměř bez oslnění. V celém návrhu osvětlení předškolního zařízení není splněn požadavek na minimální osvětlenost 300 lx pouze při nastavení osvětlovací soustavy na relaxační režim v Oddechové místnosti při teplotě chromatičnosti 3000 K. U tohoto nedostatku je vhodné zvážit, zda je při plánovaném odpočinku po obědě od 12:00 do 14:00 (tab. 2.4) nutná osvětlenost prostoru na hodnotu 300 lx.

Index UGR

Rovina hodnocení oslnění pomocí indexu UGR byla v simulaci osvětlení nastavena podle vyhlášky 410/2005 Sb. do výšky 0,45 m. Dle růstového grafu se však výška dětí ve věku od tří do šesti let

rovná průměrné hodnotě 1,08 m. Tento údaj byl získán z růstových grafů dostupných na <http://www.szu.cz>. Průměrná výška dítěte v závislosti na jeho věku a pohlaví je uvedena v tabulce 3.3. Do prostředí programu pro návrh osvětlení byla tak vložena další srovnávací rovina hodnotící index oslnění UGR ve výšce 1,08 m, která zohledňuje průměrnou výšku dítěte a hodnotí oslnění při pohybu dětí v osvětlovaném prostoru.

Tabulka 3.3: Průměrná výška dítěte v závislosti na jeho věku a pohlaví. Převzato z <http://www.szu.cz>

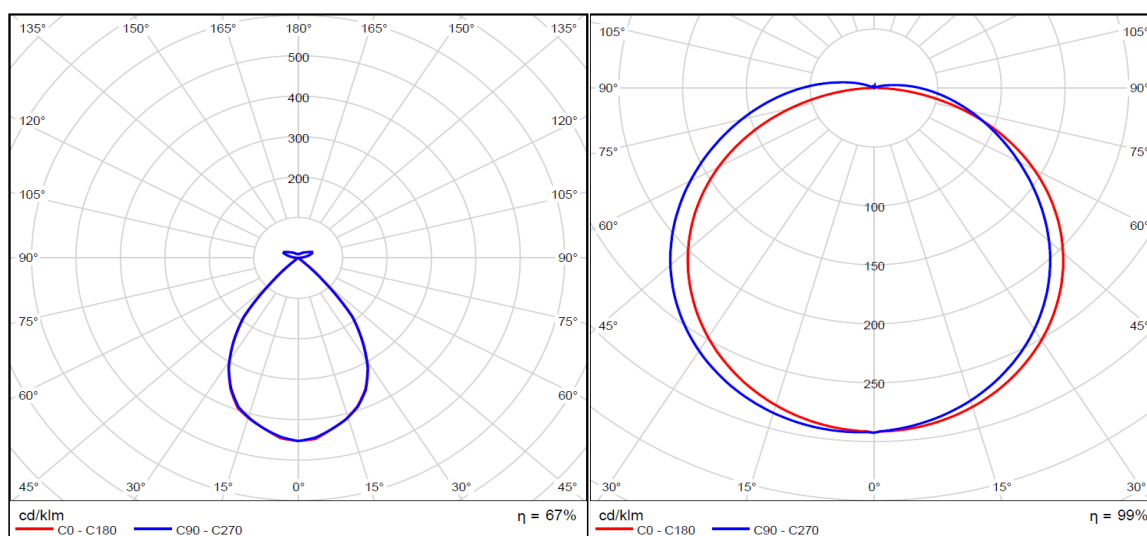
Věk [let]	Průměrná výška dívky [m]	Průměrná výška chlapce [m]
3	0,96	0,98
4	1,04	1,06
5	1,12	1,12
6	1,18	1,19
Aritmetický průměr:	1,07	1,08

Poznámka

Dialux Evo používá pro výpočet osvětlenosti bodovou metodu. Za bodový zdroj se považuje svítidlo (resp. světelný zdroj), jehož rozměry svítícího povrchu jsou zanedbatelné v porovnání se vzdáleností od osvětlovaného okolí kontrolního bodu. Pokud je největší rozměr svítící plochy svítidla menší, než jedna pětina vzdálenosti svítidla od nejbližšího kontrolního místa, je chyba výpočtu menší než 5 % [10]. V návrhu osvětlení prostoru navrženým svítidlem není tato podmínka splněna ani pro jeden z poloprostorů. Největší rozměr svítící plochy svítidla není ani v jednom případě menší, než jedna pětina vzdálenosti svítidla od nejbližšího kontrolního místa. V návrhu osvětlení v této práci není tedy zaručeno, že chyba výpočtu je nižší jak 5 %.

4 POROVNÁNÍ NÁVRHU OSVĚTLENÍ S KONVENČNÍM NÁVRHEM Z HLEDISKA ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI A KVALITY OSVĚTLENÍ

Konvenčním svítidlem, se kterým je navržené osvětlení v trendu HCL porovnáváno v této kapitole je běžné kancelářské stropní svítidlo ECOLITE PILO TL240–LED36W 120CM [69]. Křivky svítivosti obou produktů jsou uvedeny na obrázku 4.1. V první fázi jsou shrnuty a uvedeny parametry těchto dvou svítidel v tabulce 4.1. V následujícím kroku je návrh prostoru mateřské školy vytvořený v kapitole 3 osvětlen konvenčním produktem Ecolite PILO. Podrobná zpráva osvětlení prostoru je opět k nalezení na přiloženém CD.



Obrázek 4.1: Polární grafy srovnávaných svítidel: Vlevo křivka svítivosti HCL produktu. Vpravo konvenční svítidlo Ecolite PILO TL240.

Už z tabulky porovnání 4.1 lze posoudit tato dvě svítidla. Kromě toho, že HCL svítidlo je zřejmě řazeno do vyšší kategorie svítidel díky možnosti dynamického řízení zdroje a smíšenému typu osvětlení prostoru, převyšuje nad konvenční variantou Ecolite PILO zejména ve faktorech ovlivňujících pocitový stav osob vyskytujících se v osvětlovaném prostoru. HCL produkt má značně vyšší hodnotu indexu podání barev R_a , což značí větší podobnost dennímu světlu. Jak moc je důležité pro člověka denní světlo, bylo již popsáno v první polovině teoretické části této práce (kap. 1). Svítidlo v trendu HCL dále nezpůsobuje téměř žádné oslnění a tak dopřává větší zrakovou pohodu. Srovnávaný konvenční produkt zato vytváří nadměrné oslnění, které dokonce dle konkrétní smyšlené simulace osvětlení v Dialuxu Evo neplní zákonné požadavky. Ověřit si toto tvrzení je možné vložením přiloženého souboru obsahujícího křivky svítivosti svítidla Ecolite PILO TL240 do prostředí Dialuxu Evo a provést simulaci osvětlení prostoru mateřské školy. Další velkou výhodou smíšeného osvětlení a HCL produktu je, že oproti přímému osvětlení nedochází tolik k tvorbě ostrých tmavých stínů a velkých kontrastů jasů. Jelikož vyzařuje světelný tok HCL svítidla zároveň do dolního i horního poloprostoru, mělo by docházet k vyšší rovnoměrnosti osvětlení a v osvětlovaném prostoru tak vznikat měkčí a příjemnější stíny.

Naopak mezi nevýhody HCL svítidla patří zejména vysoká pořizovací cena a spotřeba elektrické

energie. Ve srovnání s konvenčním svítidlem od výrobce Ecolite má poloviční hodnotu světelného výtěžku a dvakrát větší specifický příkon. Tedy při vyzáření stejného světelného toku z obou typů svítidel spotřebuje HCL svítidlo dvakrát více energie. Dále lze usoudit dle návrhu v kapitole 2, že pořizovací cena takového HCL produktu bude několikrát vyšší oproti konvenční variantě. Na základě těchto informací je možné obecně tvrdit, že interiérové svítidlo v trendu HCL je téměř ve všech ohledech finančně náročnější oproti konvenční variantě osvětlení. Při porovnání svítidla vytvořeného v této práci s konvenčním svítidlem Ecolite TL240 v softwaru Dialux Evo nebyly nalezeny další zásadní rozdíly kromě výše zmíněných.

Tabulka 4.1: Srovnání parametrů navrženého HCL produktu s konvenčním LED kancelářským svítidlem ECOLITE PILO TL240 [69].

Parametry	Svítidlo v trendu HCL	ECOLITE PILO TL240
Typ svítidla	závěsné	stropní
Typ osvětlení	smíšené	přímé
Dynamické řízení	ano	ne
Vyzařovací úhel [°]	75	120
Životnost [hod.]	> 50000	> 30000
Zdroj	30×High Power LED RGBW	200×SMD LED
Příkon zdroje [W]	42 (při 5000 K)	36
T_{ch} [K]	3000–5000	4100
Ra [-]	> 90	> 80
UGR (návrh mateřská škola) [-]	< 13,8	< 22,3
Světelný výtěžek [lm/W]	51,2	100,4
Specifický příkon [W/m^2]	12,9	6,55
Cena [Kč]	v jednotkách tisíců Kč	890

ZÁVĚR

Současný stav poznání v oblasti vlivu umělého osvětlení na člověka, byl popsán s důrazem na citlivost cirkadiánního systému lidského těla. Tato část práce uvádí několik konkrétních modelů citlivosti, které vznikaly během postupného vývoje a objevování v oblasti HCL. V teoretické části dále následovalo cílené představení jednotlivých veličin a metod, které jsou následně používány během celého návrhu a finálního hodnocení svítidla jako kritéria. Tuto rozsáhlou, a na značném množství literárních zdrojů založenou kapitolu, ukončuje nastínění obecného modelu svítidla v trendu HCL a základní výpočet tepelného managementu LED světelného zdroje.

Po obsáhlém teoretickém úvodu byl návrh svítidla započat definicí světelného zdroje. Z velkého množství dnes dostupných LED světelných diod byl vybrán jako nejvhodnější produkt Osram Oslon SSL150 RGBW zejména kvůli vysoké hodnotě indexu podání barev $R_a > 90$, velkému světelnému toku a vlastnostem tepelného managementu LED. Změřením těchto světelných diod ve světelné laboratoři na Ústavu Elektroenergetiky, nacházejícím se na FEKT VUT v Brně, byla získána vstupní data pro optický návrh a řízení spektrálního zdroje svítidla. Důsledným návrhem světelného zdroje byl tak vytvořen vhodný základ pro dále zpracovaný optický návrh svítidla.

Mezi hlavní výhody optického návrhu svítidla, provedeného v programu LighTools a řadicího se do kategorie smíšeného osvětlení, patří dosažení požadovaného poměru výstupu světelného toku jak do horního, tak spodního poloprostoru osvětlované místnosti. Přibližně 83 % vyzářeného toku dopadá do spodního poloprostoru a tvoří přímé osvětlení. Zbytek energie osvětluje strop místnosti a reprezentuje nepřímou složku osvětlení. Takto vyvážené rozdělení světelného toku zajistí rovnoměrnou osvětlenost prostoru, sníží množství tmavých stínů a velkých kontrastů jasně, čímž bude celý osvětlovaný prostor pro člověka pohodlnější. Bude docházet k lepšímu vizuálnímu vjemu lidského oka alepší se světelná pohoda tohoto prostředí. Účinnost celého optického systému je rovna 67 % a převyšuje odhadovanou hodnotu. Dále je docíleno rovnoměrného rozložení intenzity a barevné homogenity na obou výstupech svítidla. Při řízení zdroje tak nebude docházet k viditelným barevným rozdílům a vyzařující světlo bude měkké, homogenní a v každém směru co nejvíce spektrálně shodné.

Hlavní předností svítidla je značná podobnost dennímu světlu, což dokazují hodnoty indexů $R_f = 91,6$, $R_a = 91,6$ a $R_g = 104,2$, které se navíc nacházejí v mezích tolerancí (stanovených v kap. 1.6.2) s hodnotami odchylek $\Delta_{uv} = 0,00289$ a $D_{uv} = 0,003$. Hlavní funkcí řadicí svítidlo do kategorie HCL je dynamické řízení zdroje, které bylo v této práci provedeno na konkrétní aplikaci osvětlení pro předškolní zařízení. Míra ovlivnění lidského organismu navrženým svítidlem byla hodnocena pomocí HCL veličiny $a_{v,mel}$ (činitel cirkadiánní účinnosti) a metody α -osvětlení na krajních hodnotách řízení světelného zdroje 3000 K a 5000 K. Hodnota $a_{v,mel} = 0,72$ pro 5000 K vyjadřuje stimul cirkadiánního systému velmi podobný takovému, jaký vyvolává normalizované denní světlo D50. Tato skutečnost je dalším měřítkem podobnosti spektrálního složení zdroje navrženého svítidla dennímu světlu.

Funkčnost návrhu svítidla spolu s plněním zákonných požadavků byla ověřena na návrhu osvětlení mateřské školy v softwaru Dialux EVO. Tato simulace osvětlovací soustavy na konkrétní aplikaci byla velmi významná při optickém návrhu svítidla. Pracovat v obou softwarech současně a v co největší míře využít jejich možností a funkcionalitu, umožnilo vytvořit vyrobiteľný a funkční produkt. Svítidlo v trendu HCL bylo tak navrženo na míru vytvořené aplikaci v programu Dialux EVO.

Z porovnání vyvinutého produktu s konvenční alternativou provedeného v poslední kapitole práce je zřejmé, že nedostatkem svítidla v trendu HCL je finanční stránka. Konvenční svítidlo Ecolite PILO TL240 má dvakrát nižší spotřebu elektrické energie, pravděpodobně několikrát nižší pořizovací cenu a dvakrát vyšší hodnotu světelného výtěžku [lm/W]. Při návrhu osvětlení je tedy důležité si zvolit, zda bude kladen důraz na finanční stránku nebo na kvalitu světla působícího na člověka. Tyto dva pohledy jsou dle diplomové práce protichůdné.

Přínosem této diplomové práce je zejména vyzdvižení tématu Human Centric Lightin a odůvodnění jeho důležitosti. U návrhu svítidel i celých osvětlovacích soustav často rozhodují parametry, jako množství světla a energetická účinnost, přičemž na kvalitu světla je často zapomínáno. Neustálé opakování významu a důležitosti kvality světelného prostředí, ve kterém tráví mnozí z nás velké množství času, by mohlo vést k většímu uvědomění, pochopení tématu a zařazení kvality světla mezi hlavní parametry návrhu. Práce může sloužit také jako jakýsi průvodce při návrhu svítidla v trendu HCL.

Směr dalšího výzkumu by mohl vést ke zlepšení a zkvalitnění návrhu jak celého svítidla, tak jeho zdroje. Možná inovace zdroje se nabízí například ve volbě většího počtu bílých LED se současným snížením počtu barevných diod. Při návrhu osvětlení mateřské školy byl podhodnocen světelný tok svítidla vzhledem k zákonným požadavkům při nastavení zdroje na teplotu chromatičnosti 3000 K. Inovace návrhu by tak vedla k dosažení vyššího světelného toku svítidla a odstranění tohoto nedostatku návrhu. Prostor se nabízí i například ve volbě způsobu uspořádání LED na DPS nebo zvýšení účinnosti celého optického systému svítidla.

Z výše uvedeného je zřejmé, že cíle práce definované v zadání byly v plném rozsahu splněny.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] PROVENCIO I., G. JIANG, W.J. DE GRIP et al. Melanopsin: An opsin in melanophores, brain, and eye. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* [online]. 1998, **95**(1), s. 340-345 [cit. 2018-02-27]. PMID: 9419377. ISSN 1091-6490. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC18217>
- [2] MAIEROVÁ, Lenka. *Světelné prostředí v budovách: Nevizuální vnímání světla a inter-individuální rozdíly* [online]. Praha, 2015 [cit. 2018-02-27], 218 s. Dostupné z: <http://tzb.fsv.cvut.cz/vyucujici/76/dis-svetelne-prostredi-v-budovach.pdf>. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.
- [3] CZEISLER, C.A. a J.J. GOOLEY. Sleep and Circadian Rhythms in Humans. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology* [online]. 2007, **72**(1), s. 579-597 [cit. 2018-02-27]. DOI: 10.1101/sqb.2007.72.064. ISSN 0091-7451. Dostupné z: <http://symposium.cshlp.org/cgi/doi/10.1101/sqb.2007.72.064>
- [4] EUGENIA, V. Ellis, E.W. GONZALEZ, D.A. KRATZER et al. Auto-tuning Daylight with LEDs: Sustainable Lighting for Health and Wellbeing. In: *Architectural Research Conference* [online]. Charlotte, 2013, s. 465-473 [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: <http://www.arcc-journal.org/index.php/repository/article/view/202/156>
- [5] REA, Mark S., John D. BULLOUGH a Mariana G. FIGUEIRO. Phototransduction for human melatonin suppression. *Journal of Pineal Research* [online]. 2002, **32**(4), s. 209-213 [cit. 2018-03-05]. DOI: 10.1034/j.1600-079X.2002.01881.x. ISSN 0742-3098. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1034/j.1600-079X.2002.01881.x>
- [6] BRAINARD, George C., David SLINEY, John P. HANIFIN et al. Sensitivity of the Human Circadian System to Short-Wavelength (420-nm) Light. *Journal of Biological Rhythms* [online]. 2008, **23**(5), s. 379-386 [cit. 2018-03-08]. DOI: 10.1177/0748730408323089. ISSN 0748-7304. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0748730408323089>
- [7] REA, M.S., M.G. FIGUEIRO, A. BIERMAN a R. HAMNER. *Modelling the spectral sensitivity of the human circadian system* [online]. 2012, **44**(4), s. 386-396 [cit. 2018-03-04]. DOI: 10.1177/1477153511430474. ISSN 1477-1535. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1477153511430474>
- [8] FIGUEIRO, Mariana G., John D. BULLOUGH a Mark S. REA. *Spectral Sensitivity of the Circadian System* [online]. 2004, s. 207-214 [cit. 2018-03-15]. DOI: 10.1117/12.511856. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.511856>
- [9] REA, Mark S., Mariana G. FIGUEIRO, John D. BULLOUGH et al. A model of phototransduction by the human circadian system. *Brain Research Reviews* [online]. 2005, **50**(2), s. 213-228 [cit. 2018-04-03]. DOI: 10.1016/j.brainresrev.2005.07.002. ISSN 01650173. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165017305001104>
- [10] HABEL, Jiří. *Světlo a osvětlování*. 2.vyd. Praha: FCC Public, 2013, 622 s. ISBN 978-80-86534-21-3

- [11] ROTREKL, M. *Hodnocení oslnění vnitřních a venkovních osvětlovacích soustav* [online]. Brno, 2015 [cit. 2018-03-13], 71 s. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/39071>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [12] THAPAN, Kavita, Josephine ARENDT a Debra J. SKENE. An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. *The Journal of Physiology* [online]. 2001, **535**(1), s. 261-267 [cit. 2018-03-24]. DOI: 10.1111/j.1469-7793.2001.t01-1-00261.x. ISSN 00223751. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1469-7793.2001.t01-1-00261.x>
- [13] LUCAS, Robert J., Stuart N. PEIRSON, David M. BERSON, et al. Measuring and using light in the melanopsin age. *Trends in Neurosciences* [online]. 2014, **37**(1), s. 1-9 [cit. 2018-03-04]. DOI: 10.1016/j.tins.2013.10.004. ISSN 01662236. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0166223613001975>
- [14] CIE TN 003:2015. *Report on the First International Workshop on Circadian and Neurophysiological Photometry* [online]. 2013, 39 s. [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: http://files.cie.co.at/785_CIE_TN_003-2015.pdf
- [15] ŠPÉROVÁ, Lenka. *Cirkadiánní rytmy u člověka* [online]. Brno, 2008 [cit. 2018-02-27], 62 s. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/174284/prif_b/BAKALARSKA_PRACE.pdf. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce doc. RNDr. Miroslav Králík, Ph.D.
- [16] FUKSA, Antonín. Světlo a biologické hodiny. *Světlo: časopis pro světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2010, (6), s. 56-58. ISSN 1212-0812.
- [17] MARKWELL, Emma. *IpRGCs contributions to the post-illumination pupile response and circadian rhythm* [online]. Queensland, 2011 [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <https://eprints.qut.edu.au/44136/>. Disertační práce. School of Optometry and Institute of Health and Biomedical Innovation.
- [18] BRAINARD, George C., John P. HANIFIN, Jeffrey M. GREESON et al. Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor. *The Journal of neuroscience* [online]. 2001, **21**(16), s. 6405-6412 [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/11854925_Action_Spectrum_for_Melatonin_Regulation_in_Humans_Evidence_for_a_Novel_Circadian_Photoreceptor
- [19] ZANDE, Bianca. Human Centric Lighting. In: <Http://www.lighting.philips.com> [online]. 2016 [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: <http://www.lighting.philips.com/main/education/lighting-university>
- [20] MAIEROVÁ, Lenka. Světelné prostředí v budovách z pohledu nevizuálního vnímání světla. In: *Symposium Společnosti pro techniku prostředí* [online]. Buštěhrad, 2015, s. 167-172 [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: http://www.uceeb.cz/system/files/souboryredakce/maierova_svetelne_prostredi_v_budovach.pdf
- [21] DVOŘÁK, P. *Vliv modrého světla na lidský organismus* [online]. Brno, 2016 [cit. 2017-12-12], 78 s. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/60483>. Bakalářská

práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.

- [22] MATOUŠEK, Jiří. *Vliv světla a osvětlení na člověka* [online]. 2004 [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <http://elektro.tzb-info.cz/osvetleni/1794-vliv-svetla-a-osvetleni-na-cloveka>
- [23] ŠTĚPÁNEK, J. a J. ŠKODA. Cirkadiánní aktivační index denního světla. *Světlo: časopis pro světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2017, (3), s. 41-43. ISSN 1212-0812.
- [24] ARISOVÁ, Kristina. *Biologické aspekty stresu* [online]. Praha, 2013 [cit. 2018-02-27], 58 s. Dostupné z: <https://is.cuni.cz/webapps/zzp/detail/123681/>. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze, Filozofická fakulta.
- [25] MELOVÁ, Soňa. *Vliv osvětlení na fungování biologických hodin* [online]. 2014 [cit. 2018-02-25]. Dostupné z: <https://fryaled.com/cs/blog/vliv-osvetleni-na-fungovani-biologickyx-hodin>
- [26] RUBY, N. F. Role of Melanopsin in Circadian Responses to Light. *Science* [online]. **298**(5601), s. 2211-2213 [cit. 2018-03-15]. DOI: 10.1126/science.1076701. ISSN 00368075. Dostupné z: <http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.1076701>
- [27] LUCAS, Robert J., Stuart N. PEIRSON, David BERSON et al. *Irradiance Toolbox* [online]. 2013, 19 s. [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <http://personalpages.manchester.ac.uk/staff/robert.lucas/Lucas%20et%20a1%202014%20suppl%20text.pdf>
- [28] ZEITZER, Jamie M., Derk-Jan DIJK, R.E. KRONAUER et al. Sensitivity of the human circadian pacemaker to nocturnal light: melatonin phase resetting and suppression. *The Journal of Physiology* [online]. 2000, **526**(3), s. 695-702 [cit. 2018-03-04]. DOI: 10.1111/j.1469-7793.2000.00695.x. ISSN 00223751. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1469-7793.2000.00695.x>
- [29] GALL, Dietrich. Die Messung circadianer Strahlungsgrößen. In: *Licht und Gesundheit* [online]. Berlin: Kistmacher, 2004, s. 120-138 [cit. 2018-03-18]. ISBN 3-9807635-0-1. Dostupné z: https://www.li.tu-berlin.de/fileadmin/a343115/Veranstaltungen/Licht_und_Gesundheit/LuG_2004_digital.pdf
- [30] MCLNTYRE, Iain M., Trevor R. NORMAN, Graham D. BURROWS et al. Human Melatonin Suppression by Light is Intensity Dependent. *Journal of Pineal Research* [online]. 1989, **6**(2), s. 149-156 [cit. 2018-04-06]. DOI: 10.1111/j.1600-079X.1989.tb00412.x. ISSN 0742-3098. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1600-079X.1989.tb00412.x>
- [31] FIGUEIRO, Mariana G., John D. BULLOUGH, Robert H. PARSONS a Mark S. REA. Preliminary evidence for spectral opponency in the suppression of melatonin by light in humans. *NeuroReport* [online]. 2004, **15**(2), s. 313-316 [cit. 2018-04-06]. DOI: 10.1097/00001756-200402090-00020. ISSN 0959-4965. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15076759>
- [32] DIN SPEC 5031. *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Teil 100: Über das Auge vermittelte, melanopische Wirkung des Lichts auf den Menschen - Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2015.

- [33] DAVID, Aurelien, Paul T. FINI, Kevin W. HOUSER, Yoshi OHNO et al. Development of the IES method for evaluating the color rendition of light sources. *Optics Express* [online]. 2015, **23**(12), 19 s. [cit. 2018-02-18]. DOI: 10.1364/OE.23.015888. ISSN 1094-4087. Dostupné z: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=oe-23-12-15888>
- [34] ČSN EN 12464-1. *Světlo a osvětlení - Osvětlení pracovních prostorů - Část 1: Vnitřní pracovní prostory*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [35] NOVÁK, Pavel. *Návrh a konstrukce pokročilého LED osvětlovacího systému pro akvárium*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, 2015, 48 s.
- [36] SMITH, Joe. *Designer's Notebook: Calculating Color Temperature and Illuminance using the TAOS TCS3414CS Digital Color Sensor* [online]. 2009, 7 s. [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: <http://ams.com/ger/content/view/download/145158>
- [37] ANSI ANSLG C78.377-2011. *Specifications for the Chromaticity of Solid State Lighting Products*. Washington: National Electrical Manufacturers Association, 2011.
- [38] CIE 1960 color space. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001, 2016 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/CIE_1960_color_space
- [39] VRTEK, Mojmir. *Sluneční energie* [online]. Ostrava [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/old_web/_files/projekty/enazp/21/IUT/140_Slunecni_energie_-_Vrtek_-_P3.pdf. Výukový text. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [40] Spectrometers Prove to be Worthy Investment for Lighting Professionals. In: *Dr. Bulb* [online]. 2017 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: <http://drbulb.com/spectrometers-prove-to-be-worthy-investment-for-lighting-professionals>
- [41] *CIE Position Statement on CRI and Colour Quality Metrics* [online]. International commission on Illumination, 2015, 2 s. [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: <http://www.cie.co.at/publications/position-statement-cri-and-colour-quality-metrics-october-15-2015>
- [42] YAGUCHI, H. CIE 2017 Colour Fidelity Index. In: *Proceedings of the Conference on "Smarter Lighting for Better Life" at the CIE Midterm Meeting*. Jeju (South Korea), 2017, s. 10-16. DOI: 10.25039/x44.2017.IP04. ISBN 978-3-901906-95-4.
- [43] *What's the difference between CRI, CQS, and IES TM-30 and why is it important?*. In: Flexfireleds [online]. [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: <https://www.flexfireleds.com/what-is-tm-30-15-and-cri-and-cqs>
- [44] *ColorCalculator User Guide* [online]. OSRAM Sylvania [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: <https://www.osram.us/cb/tools-and-resources/applications/led-colorcalculator/index.jsp>
- [45] SYLVANIA Tools and Resources. *Sylvania* [online]. LEDVANCE, 2016 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://www.sylvania.com/en-us/tools-and-resources/Pages/default.aspx#>

- [46] CRI IES RfRg. *GitHub* [online]. GitHub, 2018 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: https://github.com/ksmet1977/CRI_IES_RfRg
- [47] KOŠČ, Filip. Posouzení oslnění v soustavách s LED: Metrolux. In: *Světlo v praxi* [online]. s. 23 [cit. 2018-01-20]. Dostupné z: <http://svetlovpraxi.cz/wp-content/uploads/2016/05/UGR-Ing.-Filip-Ko%C5%A1%C4%8D.pdf>
- [48] ŠTĚPÁNEK, Jaroslav, Jan ŠKODA, Michal KRBAL a Vojtěch WASSERBAUER. Comparison of light sources for household use due circadian effect. In: *17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)* [online]. IEEE, 2016, s. 1-4 [cit. 2018-05-13]. DOI: 10.1109/EPE.2016.7521792. ISBN 978-1-5090-0908-4. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7521792/>
- [49] AMUNDADOTTIR, M.L., M. LOCKLEY, M. ANDERSEN et al. *A unified framework for evaluating non-visual spectral effectiveness of ocular light exposure: key concepts* [online]. Manchester: 28th CIE Session, 2015, 10 s. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: https://infoscience.epfl.ch/record/208817/files/Amundadottir_Unified_framework_CIE2015_fullpaper.pdf
- [50] WRIGHT, Maury. Speakers cover circadian disruption to healthcare assessment at new conference. *LEDs Magazine* [online]. 2017 [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <http://www.ledsmagazine.com/articles>
- [51] DIN SPEC 67600. *Biologically effective illumination: Design guidelines*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2013.
- [52] *F.lux: software to make your life better* [online]. 2014 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://justgetflux.com/>
- [53] ZEMAN, Milan. *Vliv teploty přechodu na provozní parametry a životnost výkonných modulů LED* [online]. Brno, 2012 [cit. 2018-05-07], 41 s. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=55386. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [54] SCHENK, David. *Optimalizace desky plošného spoje pro výkonovou LED* [online]. Brno, 2013 [cit. 2018-05-07], 110 s. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=68151. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [55] SLÁMA, Pavel. *Vliv teploty na světelně-technické parametry LED* [online]. Brno, 2015 [cit. 2018-05-07], 50 s. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=103110. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [56] TALČÍKOVÁ, Stanislava. *Školní vzdělávací program pro předškolní vzdělávání: Žijeme zdravě* [online]. 10. srpna 2017, 36 s. [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <http://zsrazova.net/wp-content/uploads/%C5%A0VP-M%C5%A0-Razov%C3%A1.pdf>
- [57] HORKÝ, L. *Porovnání současných světelných zdrojů* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2018-04-30], 62 s. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/2804/1/Lukas%20Horky%20-bp-%20Porovnan%C3%AD%20soucasnych%20svetelnych%20zdroju.pdf>. Bakalářská práce. Západočeská Univerzita V Plzni Fakulta Elektrotechnická, Katedra Elektromechaniky A Výkonové Elektroniky.

- [58] KOŽDOŇ, J. *Světelný zdroj s nastavitelnou intenzitou osvětlení* [online]. Brno, 2014 [cit. 2018-04-30], 66 s. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/32576/xkozdo00.pdf?sequence=-1>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [59] *Osram: Opto Semiconductors* [online]. OSRAM Opto Semiconductors, 2018 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <https://www.osram.com/cb/index.jsp>
- [60] *Cree* [online]. Cree, 2018 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://www.cree.com/>
- [61] VILÉM, J. *Návrh a optimalizace varifokálního objektivu* [online]. Brno, 2015 [cit. 2018-05-07], 94 s. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/41771?show=full>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [62] MATTHEW S. BRENNESHOLTZ a EDWARD H. STUPP. *Projection displays*. 2nd ed. Chichester, U.K: J. Wiley, 2008. ISBN 978-047-0518-038. Upravit citaci Zkopírovat citaci
- [63] *Luminit: Shaping light as needed* [online]. Luminit, LLC., 2018 [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <https://www.luminitco.com/products/light-shaping-diffusers>
- [64] HUDEČKOVÁ, M. *Teorie barevného vidění* [online]. Brno, 2017 [cit. 2018-05-08], 53 s. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/427559/lf_b/Monika_Hudeckova_Teorie_barevneho_videni.pdf. Bakalářská práce. Masarykova univerzita v Brně, Lékařská fakulta.
- [65] SUPPA, Manfred a Johannes TEKATH. *Conformal coatings, solder resists and casting compounds: optical requirements and performance in LED applications* [online]. PETERS, Coating Innovations for Electronics, 2014 [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: https://www.peters.de/index.php/document/download_document/71/_en
- [66] GOOLEY, J. J., S. M. W. RAJARATNAM, G. C. BRAINARD et al. Spectral Responses of the Human Circadian System Depend on the Irradiance and Duration of Exposure to Light. *Science Translational Medicine* [online]. 2010, **2**(31), 21 s. [cit. 2018-04-24]. DOI: 10.1126/scitranslmed.3000741. ISSN 1946-6234. Dostupné z: <http://stm.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/scitranslmed.3000741>
- [67] *Světloblog* [online]. [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://www.svetloblog.cz/index.php?svetlo=vypocet-udrzovaciho-cinitele>
- [68] HLADÍK, Jaroslav. *Zhotovení druhé vodivé vrstvy na jednovrstvé DPS* [online]. Brno, 2008 [cit. 2018-05-07], 51 s. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=8704. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [69] *TopLux* [online]. Praha: TopLux - Osvětlení Praha, 2018 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.toplux.cz/zarivkova-svitidla/pilo-36w/>
- [70] FOTIOS, Steve. A Revised Kruithof Graph Based on Empirical Data. *LEUKOS* [online]. 2016, **13**(1), s. 3-17 [cit. 2018-04-21]. DOI: 10.1080/15502724.2016.1159137. ISSN 1550-2724. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15502724.2016.1159137>

- [71] KOCOUREK, Alexandr. DRAWBRIDGE má recept na modré světlo v LED osvětlení. *Světlo: časopis pro světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2017, (4), s. 40-41. ISSN 1212-0812.
- [72] HAYES, Caroline. Research assesses the value of human-centric lighting. *LEDs Magazine* [online]. 2015 [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <http://www.ledsmagazine.com/articles/print/volume-12/issue-7/features/human-centric-lighting/research-assesses-the-value-of-human-centric-lighting.html>
- [73] WOOLLEY, Martin. Lighting as a Platform Part 2: Creating the Smart Building. *LEDs Magazine* [online]. 2017 [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <http://www.ledsmagazine.com/na/bluetooth/lighting-as-a-platform-part-2-creating-the-smart-building.html?mvt=i&mvn=6362508761804f4f91468d0ad051ef45&mvp=NA-LEDPROD-11236870&mvl=Article>
- [74] HALPER, Mark. Human-centric lighting takes hold in the commercial workplace. *LEDs Magazine* [online]. 2017 [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <http://www.ledsmagazine.com/articles>
- [75] HRDLÍK, Milan. Svetlo ako nevyhnutný predpoklad pre život. In: *Proceedings of the 22nd International Conference Light 2017*. Podbanské (SK), Slovenská svetelnotechnická spoločnosť, 2017, s. 182-187. ISBN: 978-80-972865-0-7.
- [76] KNUFFKE, Charles. Human-centric lighting is the next step in LED design and control. *LEDs Magazine* [online]. 2017 [cit. 2018-01-20]. Dostupné z: <http://www.ledsmagazine.com/articles>
- [77] TRIVELLIN, Nicola, Matteo MENEGHINI, Marco FERRETTI et al. Effects and exploitation of tunable white light for circadian rhythm and human-centric lighting. In: *IEEE 1st International Forum on Research and Technologies for Society and Industry Leveraging a better tomorrow (RTSI)* [online]. IEEE, 2015, **49**(6), s. 154-156 [cit. 2018-04-21]. DOI: 10.1109/RTSI.2015.7325089. ISBN 978-1-4673-8167-3. ISSN 1477-1535. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7325089/>
- [78] PARMA M., P. BAXANT, J. ŠKODA. Experimental LED Luminaire for Investigation of Non-visual Effect of Light to Human Circadian System. In: *Proceedings of the Lux Europa 2017 Conference, Lighting for modern society*. Ljubljana (Slovenia), University of Ljubljana, 2017, s. 658-662. ISBN: 978-961-93733-4-7.
- [79] LIPNICKÝ, Lukáš a Roman DUBNÍČKA. Influence of optical parts of led luminaires to the glare rating in interior workplaces. In: *Proceedings of the 22nd International Conference Light 2017*. Podbanské (SK), Slovenská svetelnotechnická spoločnosť, 2017, s. 230-235. ISBN: 978-80-972865-0-7.
- [80] ŠKODA, Jan a Petr BAXANT. Dependency of the colour rendering index on a combination of different light sources. In: *Proceedings of the 22nd International Conference Light 2017*. Podbanské (SK), Slovenská svetelnotechnická spoločnosť, 2017, s. 301-306. ISBN: 978-80-972865-0-7.
- [81] TÓTH, Dávid Noel a Ferenc SZABÓ. Human Centric Lighting: A case study at a manufacturing site. In: *Proceedings of the 22nd International Conference Light 2017*.

Podbanské (SK), Slovenská svetelnotechnická spoločnosť, 2017, s. 49-56. ISBN: 978-80-972865-0-7.

- [82] PARMA, Mikuláš. Modular LED Luminare with spectral power distribution of luminous flux. In: *Proceedings of the 23rd Conference STUDENT EEICT 2017*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních, 2017, s. 375-379. ISBN: 978-80-214-5496-5.
- [83] DVOŘÁČEK, Vladimír. Několik poznámek k terminologii nových světelných zdrojů. *Světlo: časopis pro světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2017, (5), s. 27-28. ISSN 1212-0812.
- [84] Inteligentní LED svítidlo RENO PROFI. *Světlo: časopis pro světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2017, (5), s. 29. ISSN 1212-0812.
- [85] MAREDA, Dan. Designové smart osvětlení Philips Hue. *Světlo: časopis pro světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2017, (5), s. 30-31. ISSN 1212-0812.
- [86] GAŠPAROVSKÝ, Dionýz. Udržiavací činitel pri návrhu a meraní osvetľovacích sústav. *Světlo: časopis pro světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2017, (5), s. 48-51. ISSN 1212-0812.
- [87] PARMA, Mikuláš, Petr BAXANT a Jan ŠKODA. Comparison of Spectral Power Distribution of Various Light Sources in Correlation to Human Circadian System. In: *Proceedings of the 21st International Conference LIGHT SVĚTLO 2015* [online]. Brno: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, 2015, s. 25-28 [cit. 2018-04-22]. DOI: 10.13164/conf.light.2015.25. ISBN 978-80-214-5244-2. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/51628>

SEZNAM PŘÍLOH NA CD

Označení	Popis	Formát	Kap.
PŘÍLOHA A:	Spektrální složení LED zdroje použitého pro názornost v první kapitole	.pdf	1.6.3
PŘÍLOHA B:	Měření spektrálního složení LED Cree XLamp XQ-E HI a HD	.pdf, .xls	2.2.1
PŘÍLOHA C:	Měření spektrálního složení LED OSRAM Oslon SSL150	.pdf, .xls	2.2.1
PŘÍLOHA D:	Odrazná fólie FUSION OPTIX PET97WR-150A	.pdf, .bsdf	2.3.3
PŘÍLOHA E:	Optická vlastnost <i>Aluminium</i> z knihovny povrchů LighTools	.pdf	2.3.4
PŘÍLOHA F:	Katalog odrazných povrchů Almeco Vega	.pdf	2.3.4
PŘÍLOHA G:	Optický návrh svítidla v trendu HCL	.LightTools file, .stp	2.3
PŘÍLOHA H:	Návrh osvětlení mateřské školy v Dialuxu EVO	.EVO, .LDT, .pdf	3
PŘÍLOHA I:	Porovnání návrhu osvětlení s konvenčním alternativou (Dialux EVO)	.txt, .pdf	4
PŘÍLOHA J:	Software LightTools	.pdf	-

Software LightTools

LightTools (také zkráceně LT) je 3D optický design software od společnosti Synopsys, který podporuje virtuální modelování, simulaci, optimalizaci a také vizualizaci aplikace osvětlení. Program LT je využíván především pro zjištění chodu paprsků optickým systémem, což je často nazýváno jako trasování paprsků. Aby bylo možné trasování provést, je nutné vložit do prostředí LT alespoň jeden světelný zdroj a jeden tzv. plošný nebo prostorový detektor neboli snímací plochu/těleso (receiver). Následně je možné zvolit množství paprsků vycházejících ze zdroje, trasovat danou optickou soustavou a analyzovat výsledný obraz.

Výsledky trasování se ukládají jako přesné paprskové souřadnice, nebo směrové kosiny paprsků dle druhu analýzy obrazu na detektoru. Přesné paprskové souřadnice jsou používány zejména pro záznam osvětlenosti (Illuminance), který se obvykle při návrhu hodnotí na plošných detektorech zastupujících osvětlovanou plochu. Detektor pak zaznamenává osvětlenost, obvykle v jednotkách lux, která dopadne na plochu detektoru. Zaznamenává se pouze plošné rozložení osvětlenosti. V druhém případě, při ukládání směrových kosinů trasovaných paprsků se jedná o záznam výsledků pomocí fotometrické veličiny svítivosti (Intensity). Při této analýze se zaznamenává směr, ze kterého dopadají světelné paprsky na detektor. Analýza pomocí svítivosti je prostorový záznam energie, který užívá mřížku se sférickými souřadnicemi.

Při použití obou druhů analýzy se hodnoty ukládají do jednotlivých buněk (binů) mřížky. Přesnost a rozlišení mřížky určuje velikost jednotlivých buněk a množství trasovaných paprsků. Volbou velké buňky v mřížce, je získána vyšší přesnost záznamu, neboť každá buňka bude obsahovat více paprsků, rozlišení mřížky bude ale vzhledem k nízkému počtu buněk nižší. Naopak volbou malé buňky, se získá nižší přesnost, neboť každá buňka bude obsahovat méně paprsků, rozlišení mřížky pak bude díky většímu množství buněk vyšší. Při analýze simulace chodu paprsků optickou soustavou je vhodné volit kompromis pro zachování dostatečné přesnosti i rozlišení. Program LT počítá odhad chyby (Error estimate) výpočtu pro zadanou velikost detektoru a zadané množství buněk. Tento odhad chyby může být využit pro kontrolu, zda rozlišení a přesnost mřížky budou dostačující. Průměrný odhad chyby mřížky (Error Estimate Average) lze spočítat z rovnice

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\sum_N f^2}}{\sum_N f}, \quad (4.1)$$

kde:

ε je odhad chyby,

f je hodnota energie, kterou nese jeden paprsek,

N je celkový počet trasovaných paprsků.

Světelné zdroje pro LT lze vkládat do prostředí softwaru z přednastavené knihovny zdrojů, nebo lze vytvořit, popř. vložit vlastní světelný zdroj. Jako detektor světelných paprsků lze zvolit libovolnou plochu systému, lze také vytvořit detektor na ploše v prostoru v konečné vzdálenosti od systému, nebo je možné vložit tzv. detektor ve vzdáleném poli (farfield receiver). Jedná se o vzdálený detektor, který zaznamenává paprsky jdoucí do nekonečna. Tento typ detektoru bývá často používán na tvorbu souborů eulundat nebo ies, které se často používají jako vstup do softwaru pro simulaci osvětlení prostoru (Dialux, Relux). Na detektoru v konečné vzdálenosti lze zaznamenávat veličiny svítivosti (polární graf) a osvětlení, zatímco na vzdáleném detektoru lze zaznamenávat pouze svítivost, tedy úhel dopadu světelného paprsku. Jako vzdálený detektor bývá

nejčastěji volena kulová plocha se sférickými, nebo úhlovými souřadnicemi. Detektor v konečné vzdálenosti nejčastěji používá rovinnou plochu s pravoúhlým souřadnicovým systémem. Poslední v této práci používaný detektor True Color Raster Chart je typem mřížky, pomocí které lze hodnotit vizuální barevný vjem každé buňky. K určení barvy každého binu jsou používány informace o CIE x, y souřadnicích spolu s množstvím energie na buňku dopadajícím. V této práci byl True Color Raster Chart detektor používán k hodnocení barveně homogenního rozložení světla na snímací rovině. Pomocí CIE souřadnic byla určena barva každé buňky mřížky. Jas každého binu byl pak určen z dat svítivosti (Intensity) na totožné mřížce. Jako bílou barvu považuje tento detektor světlo o souřadnicích $c_x = 0,3127$ a $c_y = 0,329$ s teplotou chromatičnosti 6504 K.