



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV ARCHITEKTURY

INSTITUTE OF ARCHITECTURE

SVĚTELNÝ DESIGN V ARCHITEKTUŘE

ARCHITECTURAL LIGHTING DESIGN

DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. arch. Jan Machát

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. arch. ANTONÍN ODVÁRKA, Ph.D.

BRNO 2023

KLÍČOVÁ SLOVA

Světelný design, Simulace architektonického osvětlení, Videoprojekce, Videomapping, Fasády budov, Osvětlení v architektuře, 3D Simulace osvětlení

KEYWORDS

Lighting design, Architectural lighting simulation, Video projection, Video mapping, Building facades, Lighting in architecture, 3D lighting simulation

©Ing. arch. Jan Machát
Ústav architektury
Fakulta stavební
Vysoké učení technické v Brně
Česká republika

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Ing. arch. Jan Machát *Světelný design v architektuře*. Brno, 2023. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav architektury. Vedoucí práce doc. Ing. arch. Antonín Odvárka, Ph.D.

Obsah

1	ÚVOD.....	3
11	Vymezení předpokládaných cílů disertační práce.....	3
12	Kriticky zhodnocený stav poznání v oblasti tématu disertační práce	4
2	Teoretická část	5
21	Účel osvětlení	5
22	Osvětlování budov.....	5
23	Osvětlení zblízka	6
24	Architektonické osvětlení objektu – ambientní	8
25	Osvětlení přírodních prvků	11
26	Jiné možnosti.....	12
27	Zasklené plochy	13
28	Velkoformátová projekce v architektuře	14
3	Praktická část	15
31	Popis metody.....	15
32	Zaměření budovy a tvorba 3D modelu	16
33	Práce s 3D modelem – osvětlování.....	17
34	Testování na modelu	19
35	test na reálné fasádě	21
36	Test v reálných podmínkách	24
37	Měření testu	25
38	výsledky disertační práce s uvedením nových poznatků, jejich analýza a jejich význam pro realizaci v praxi nebo pro další rozvoj oboru	27
4	Závěr.....	28
5	Seznam použitých zdrojů.....	29
	Přehled aktivit vykonaných během studia v doktorském studijním programu	31
	Dokumentace inženýrských nebo uměleckých děl.....	33
	ABSTRAKT.....	38

1 ÚVOD

Světlo, v jeho různých formách a projevech, vždy hrálo zásadní roli v životě člověka, od základní potřeby orientace v prostoru po jeho estetickou, emocionální a psychologickou hodnotu. Světlo, ať už denní nebo umělé, má schopnost transformovat prostor, vytvářet náladu, zvýraznit nebo skrýt detaily, a tak podstatně ovlivňuje naše vnímání prostředí kolem nás. V architektuře je světelný design nejen nástrojem pro zvýraznění estetických aspektů, ale také způsobem, jak vytvořit funkční, bezpečné a pohodlné prostory.

Můj vztah k světelnému designu v architektuře byl nejprve probuzen během účasti na festivalu světla Vzáří v Olomouci roku 2021. Tento festival, kde budovy oživaly prostřednictvím proměn světla a umění videomappingu, byl pro mě velkým zážitkem. Zvláštní nadšení vzbudila v mé mysli přednáška Rogera Narboniho, světově uznávaného světelného designéra, jehož inovativní přístupy ke světlu v metropolích jako Paříž mě hluboce oslovily. Příležitost zúčastnit se workshopu světelného designu a videomappingu v rámci festivalu pouze posílila mé přesvědčení o důležitosti a potenciálu tohoto oboru.

Jako student architektury jsem si tehdy uvědomil, že ačkoli Česká republika je domovem bohaté architektonické tradice, vzdělání v oblasti světelného designu zde chybí. Tento poznatek mě přiměl k samostudiu a postupně mě vedl k některým zajímavým realizacím a zakázkám, kde jsem mohl prakticky aplikovat své znalosti a vášně pro práci se světlem.

Moje cesta na doktorské studium se stala motivací k tomu, abych se dále věnoval teoretickému zkoumání světelného designu v architektuře. Věřím, že moje práce přinese světlo do tohoto oboru v našem vzdělávacím systému a napomůže k většímu uznání světelného designu v architektuře v České republice. Doufám také, že mé zkušenosti a poznatky mohou inspirovat a povzbudit další studenty architektury k hlubšímu zkoumání tohoto fascinujícího oboru.

Rozvoj mé disertační práce má ještě další dimenzi, kterou považuji za klíčovou. V současnosti existuje v našem vzdělávacím systému výrazná mezera v oblasti světelného designu v architektuře, a já pevně věřím, že můj výzkum může naplnit tento prázdný prostor. Mé úsilí, zkušenosti a poznatky, do nichž jsem investoval v průběhu svého doktorského studia, budou sloužit jako pevný teoretický základ pro výuku nově navrhovaného předmětu "Světelný design v architektuře". Mým cílem je nejenom rozšířit akademickou diskusi o tomto tématu, ale také připravit budoucí generace architektů a designérů na efektivní a inovativní využití světla ve své praxi.

11 Vymezení předpokládaných cílů disertační práce

Cíle mé disertační práce lze vymezit v následujících bodech:

- Rozvinout teoretické pochopení nauky o svícení v architektuře: Tento cíl je zaměřen na posílení teoretického základu a porozumění klíčovým aspektům světelného designu v kontextu architektury, včetně účelu osvětlení, zrakového vnímání architektury, a specifických technik a metod pro osvětlení budov a jiných objektů.
- Vytvořit a otestovat inovativní přístup k simulaci architektonického osvětlení fasád budov: Tento cíl je zaměřen na vývoj a ověření nové metody simulace osvětlení budov

pomocí videoprojekce, která by mohla nahradit tradiční, náročné metody testování světél na fasádách.

Každý z těchto cílů představuje klíčovou složku mého výzkumu a přispívá k celkovému cíli disertační práce, kterým je posílení porozumění a praxe světelného designu v architektuře v České republice.

12 Kriticky zhodnocený stav poznání v oblasti tématu disertační práce

V aktuálním vzdělávacím kontextu České republiky se bohužel setkáváme s palčivým nedostatkem v oblasti programů zaměřených na světelný design na vysokých školách orientovaných na stavitelství a architekturu. Konkrétně chybí kurzy a předměty, které by věnovaly pozornost světlu jak v rámci interiérových prostor, tak ve veřejném prostoru.

Tento nedostatek se nejenže odrazí v teoretické přípravě studentů, ale hlavně se projevuje v praxi. Architekti a designéři, se často musí spolehnout na odbornost externích dodavatelských společností, což je vystavuje riziku závislosti na komerčních zájmech těchto firem.

Stojí za zmínku, že kvalita spolupráce s těmito externími subjekty se může značně lišit v závislosti na jejich profesní integritě a etickém přístupu. V důsledku absence specifikovaných znalostí v oblasti světelného designu jsou mnozí architekti předáni na milost a nemilost těmto firmám, nemajíce na dosah ruky nestranou expertní radu.

Zejména se tak projevuje tendence firem upřednostňovat prodej svých produktů před komplexním světelným řešením, což vede k tomu, že výsledné projekty často postrádají celistvou světelnou koncepci. Zřejmě by bylo výhodné pro obě strany, kdyby architekti byli vybaveni solidním základem v oblasti osvětlení, což by je opravňovalo k lepšímu začlenění světla do svých projektů.

Při pohledu za hranice našeho státu, zejména směrem k západní Evropě a severským zemím, je zřejmý mnohem sofistikovanější přístup ke světelnému designu. Renomované instituce, jako je KTH ve Stockholmu, nabízejí specializovaná studia v oblasti světelného designu, což jsem měl možnost osobně konstatovat během mé studijní stáže. Tato zkušenost zdůrazňuje potřebu a možnosti pro Českou republiku inspirovat se a čerpat z osvědčených postupů a modelů v zahraničí.

2 TEORETICKÁ ČÁST

21 Účel osvětlení

Světlo je klíčovým prostředkem pro přenos informací o okolním prostředí pro člověka. Zrak, jako hlavní smyslový orgán, získává prostřednictvím světla 80-90 % všech informací o prostředí. Světelné záření může vyvolat řadu fyziologických a psychologických reakcí v člověku a je nepostradatelnou součástí životního prostředí. Zatímco přirozené světelné zdroje, jako je slunce, měsíc a hvězdy, jsou nezbytné pro život, umělé světelné zdroje, včetně elektrických lamp, se staly dominantními v zastavěném prostředí. Architekturní osvětlení, zejména osvětlení exteriérů, hraje klíčovou roli v urbanistické estetice, bezpečnosti a komerčních zájmech. Osvětlení může zvýšit atraktivitu a hodnotu objektů, podporovat turismus a obchod a zlepšovat bezpečnost a orientaci ve městech. Význam architekturního osvětlení je takový, že přispívá k oživení večerního města a krajiny a je prospěšné pro celou společnost.

22 Osvětlování budov

Venkovní architekturní osvětlení hraje klíčovou roli v noční estetice měst a obcí. Jeho návrh by měl být založen na komplexním plánu osvětlení, který zahrnuje architektonicko-urbanistický rozbor daného prostředí. Tento rozbor se zaměřuje na strukturu městského prostředí, včetně pozemních komunikací, veřejných prostorů a významných stavebních a přírodních prvků. Klíčovými aspekty návrhu osvětlení jsou směry pozorování, pozorovací vzdálenosti, osvětlení pozadí a okolí a odrazné vlastnosti povrchu. Při návrhu je důležité zohlednit architektonickou hodnotu objektu, jeho okolí a vizuální působení. Technické a umělecké možnosti architektonického osvětlení jsou různorodé a mohou zahrnovat prosvětlení skleněných ploch, vestavění světelných zdrojů do stěn budovy nebo použití světlometů. Výběr osvětlovací soustavy by měl zohlednit měrný výkon, dobu života a změnu parametrů okolního prostředí, jako je teplota. LED zdroje a vysokotlaké výbojky jsou považovány za nejhodnější světelné zdroje pro venkovní prostředí. Při návrhu osvětlovací soustavy je důležité zohlednit jednoduchost nebo složitost soustavy, přičemž jednodušší soustavy jsou často preferovány z hlediska údržby a nákladů.

23 Osvětlení zblízka

Obvykle je pro celkové osvětlení budovy nejlepší umístit osvětlovací soustavu ve vzdálenosti od objektu. Avšak v některých případech to není možné a osvětlovací soustava musí být umístěna přímo na budově nebo těsně u ní v terénu. Tímto vzniká situace, kdy úhel mezi optickou osou světlometu a rovinou průčelí je velmi malý a někdy se blíží nule. Z toho důvodu je náročné dosáhnout dostatečné rovnoměrnosti osvětlení plochy, protože intenzita osvětlení klesá s kosinusem úhlu dopadu světla a vzdáleností. Tento šikmý směr světla zdůrazňuje strukturu povrchu, nerovnosti a všechny články vyčnívající kolmo ke směru světla, za nimiž vznikají dlouhé stíny. Typickým příkladem je světlomet s úzkým vějířovým svazkem umístěný na pilíři s optickou osou směřující na horní římsu, téměř vodorovně s průčelím. Těsně u světlometů vznikají místa s vysokým jasem a struktura ostatní plochy je výrazně patrná. Horizontálně vystupující články jako parapety oken a římsy vynikají a za nimi se tvoří velké zastíněné plochy. Celkový efekt je dramatický hlavně kvůli velkým kontrastům jasu a nerovnoměrnosti osvětlení celé plochy průčelí (Monzer, 1980).

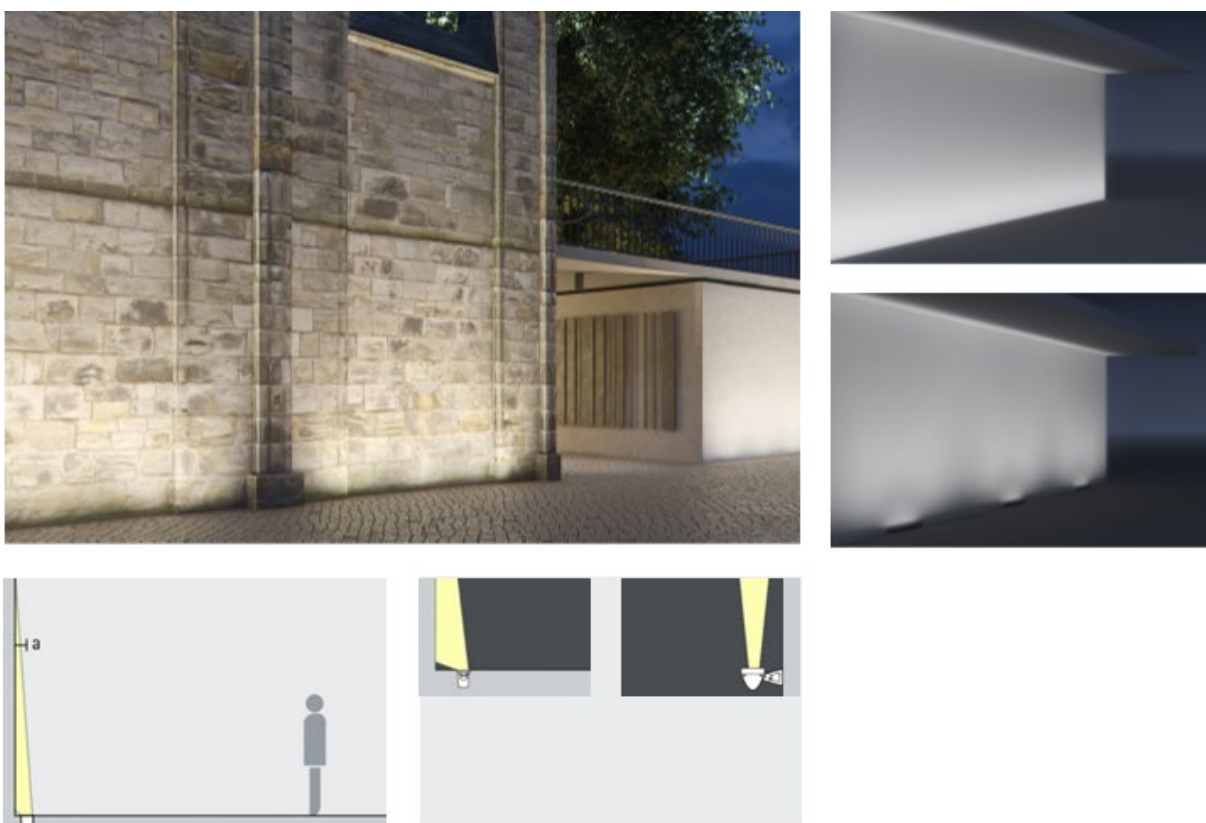


Obr. 1. Příklad osvětlení zblízka

Výhodou osvětlení zblízka je, že pouze malý podíl světla proniká do oken a nedochází tak k oslnění obyvatel budovy. To může být velmi důležité například u hotelů, které jsou často trvale osvětlovány z důvodů propagace a reprezentace. Existují i instalace, kde je fasáda osvětlována pod podobným úhlem, ale z horní části budovy, obvykle z korunní římsy. Světlometry mohou být buď zabudovány do římsy nebo umístěny do tvarovaných krytů. Výhodou této osvětlovací soustavy je, že nedochází k oslnění obyvatel budovy při pohledu z okna, ale nevýhodou bývají problémy spojené s údržbou. Pokud je z nějakého důvodu nutné umístit hlavní osvětlovací systém na horizontálně členěnou stavbu (například s několika římsami), stává se klíčovým umístění a rozteč světla, aby nedocházelo k tmavším neosvětleným místům. Průčelí bývají

obvykle pravidelně rozděleny a okna, zdivo mezi nimi, pilastry a další prvky vytvářejí rytmickou strukturu. Je vhodné, aby rozložení světla odpovídalo architektonickému uspořádání, takže rozložení světlých a tmavších ploch na fasádě odpovídá jejímu horizontálnímu členění.

Osvětlení zblízka se často používá jako doplněk k celkovému osvětlení z jiného zdroje (umístěného větší vzdálenosti), s cílem zvýraznit určité části objektu vyšším jasnem světla, nebo osvětlit určité zastíněné plochy. Kombinace obou typů osvětlení (z dálky a zblízka) obvykle přináší dobré výsledky, protože umožňuje využít jejich výhod a současně odstranit jejich nedostatky. Osvětlení zblízka lze použít jak v případech, kdy jiné řešení je složité, tak i v případech, kdy je to pouze součástí celkového osvětlení. Jeho možnosti využití jsou poměrně široké (Monzer, 1980).



Obr. 2. Příklad osvětlení zblízka neboli grazing

24 Architektonické osvětlení objektu – ambientní

Ambientní architektonické osvětlení objektu je základním prvkem světelného designu v urbanistickém prostředí. Jeho hlavním cílem je vytvoření rovnoměrného, klidného a přirozeného osvětlení, které zdůrazňuje celkový vzhled a charakter objektu nebo skupiny objektů.

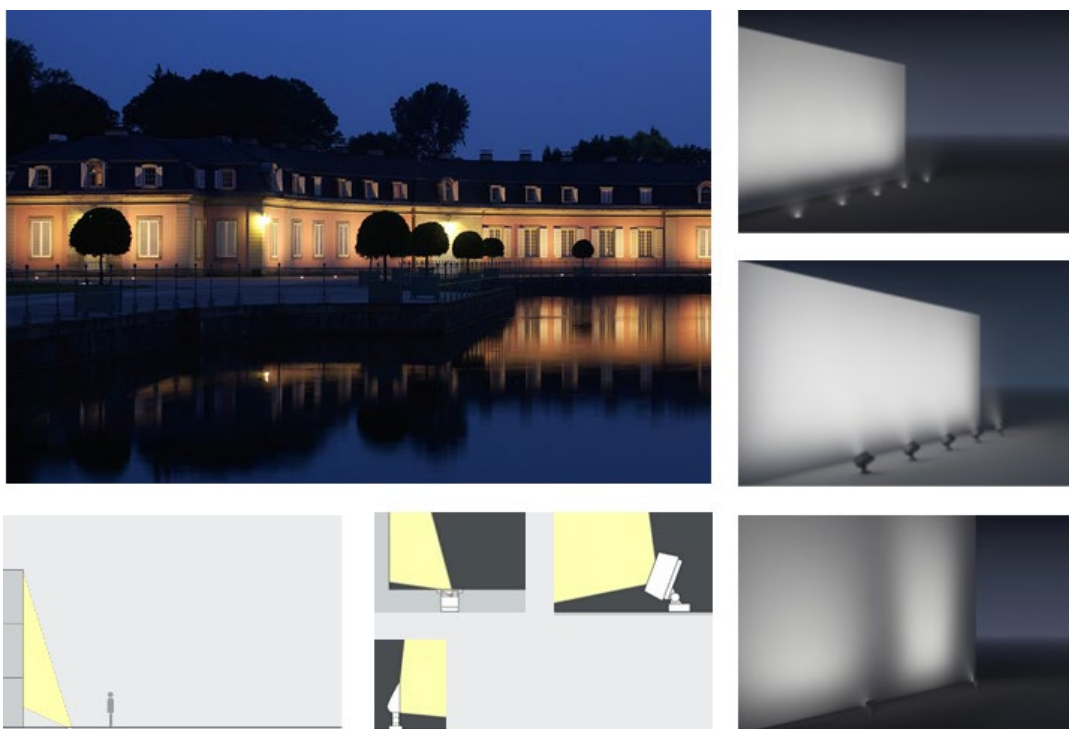
Wallwashing – plošné vertikální osvětlení z odstupu

Tato technika je charakterizována rovnoměrným a širokým světelným tokem, který se roztahuje přes větší části nebo celou fasádu budovy. "Wallwashing" doslova "umývá" stěny světlem, což vytváří hladký a jednotný vzhled. Výsledkem je akcentace textury a materiálu fasády, což může zvýraznit jemné detaily konstrukce.

Výhody "Wallwashing":

- Rovnoměrnost: Vytváří konzistentní a rovnoměrný světelný efekt po celé ploše, což eliminuje ostré stíny a kontrasty.
- Zvýraznění materiálu: Tím, že "umývá" fasádu světlem, může zdůraznit texturu a charakter materiálu, z něhož je stěna postavena.
- Prostorové definování: V případě skupiny budov může plošné osvětlení vymezit prostor mezi budovami, což poskytuje jasnou definici a orientaci v městském prostředí.
- Rovnoměrné osvětlení objektu z odstupu

Tato metoda osvětlování objektu zdůrazňuje celkový tvar a kontury budovy. Světelné zdroje jsou umístěny v odstupu od objektu, což umožňuje rovnoměrné pokrytí světlem. Tím se dosahuje přirozeného vzhledu, který nevytváří ostré stíny nebo příliš výrazné kontrasty.



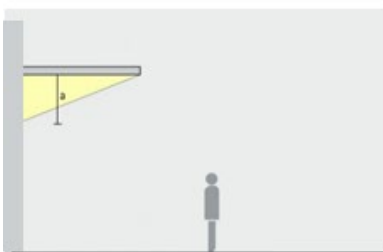
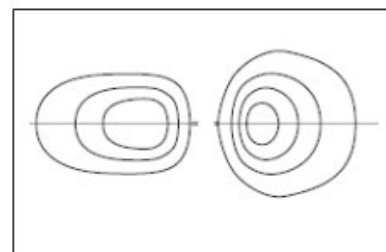
Obr. 3. Příklad wallwashing – plošné vertikální osvětlení z odstupu

Nepřímé osvětlení

Nepřímé osvětlení je technikou, která nabízí rafinovaný způsob, jak vyniknout architektonické charakteristice objektů, a zároveň poskytuje vizuální komfort bez rušivých prvků.

V architektonickém designu objektů se často setkáváme s výraznými prvky, jako jsou přesahy, konzole nebo podloubí. Tyto prvky mohou mít historickou hodnotu, například v podobě starodávných klenutí, nebo mohou představovat moderní architektonický prvek z pohledového betonu. Nepřímé osvětlení v těchto kontextech nabízí možnost zdůraznit tyto detaily a přinést je do popředí vizuálního vnímání.

Hlavní výhodou nepřímého osvětlení je, že světelný zdroj není přímo viditelný. To znamená, že pozorovatel vidí jen osvětlenou plochu nebo prvek, nikoli samotné svítidlo. Toto řešení tak minimalizuje rušivé světelné efekty a zároveň zvyšuje estetický dojem. Je to způsob, jak vytvářet teplou, pohodlnou atmosféru s maximálním vizuálním komfortem, kde hlavní roli hraje světlo a stín, nikoli technické prvky osvětlovacího systému.



Na výběr jsou 2 distribuce:
wide beam a deep beam

Obr. 4. Příklad nepřímého osvětlení

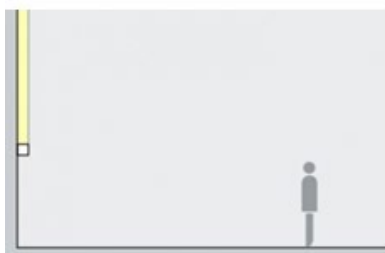
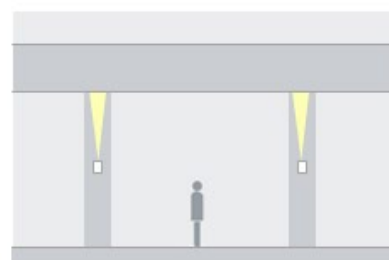
Architektonické osvětlení objektu – akcentové/tektonické

Architektonické osvětlení, zejména v kategorii akcentového nebo tektonického osvětlení, hraje zásadní roli v zvýraznění a doplnění estetických a architektonických kvalit objektu. Jeho účel není pouze iluminovat strukturu, ale vytvořit vizuální zážitek, který zdůrazňuje a oživuje specifické charakteristiky dané stavby.

Fasádní a přisazená svítidla jsou často používány k tomuto účelu. Jejich strategické umístění a orientace mohou dramaticky zvýšit vizuální vnímání objektu, přičemž zdůrazňují jeho jednotlivé architektonické detaily a vytvářejí hru světla a stínů.

V případě historické architektury reflektuje tektonické osvětlení principy konstrukce a výroby objektu. Akcentuje klíčové prvky, jako jsou oblouky, pilíře nebo jiné zdobné prvky, a zvýrazňuje jejich význam a místo v celkovém kontextu objektu.

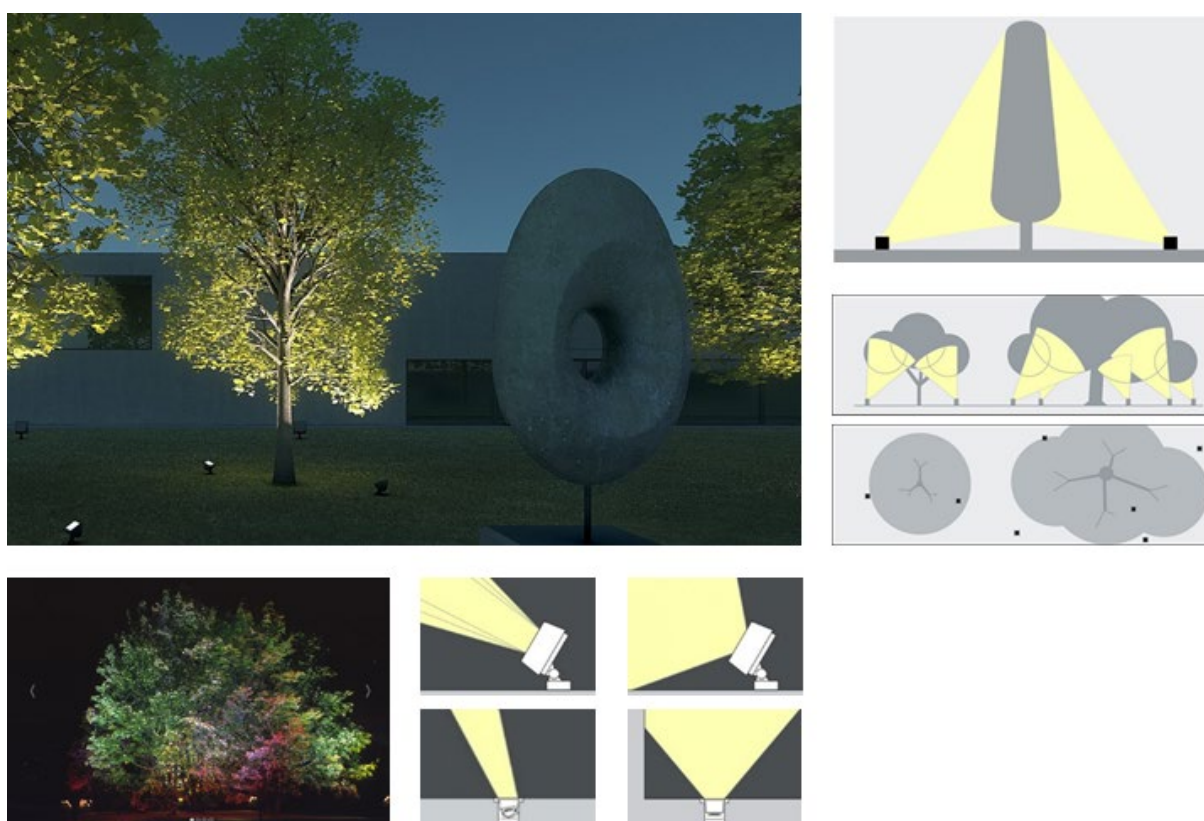
Důraz na kompoziční principy, jako je rytmus, gradace a kontrast, může být dosažen prostřednictvím promyšleného výběru a umístění fasádních svítidel. Tečné osvětlení, které ozařuje povrch téměř kolmo k osvětlenému povrchu, může výrazně zvýraznit texturu a povrchové nerovnosti fasády. Toto je obzvláště důležité u historických budov s bohatě texturovanými povrchy, kde může osvětlení vytvářet dramatické stínové efekty a zdůraznit hloubku a složitost materiálů a konstrukčních technik.



Obr. 5. Příklad akcentové a tektonické osvětlení

25 Osvětlení přírodních prvků

Umělé osvětlení v parkových a krajinářských prostorech má klíčový význam pro zvýšení bezpečnosti, orientace a estetiky. Osvětlené parky mohou odrazovat potenciální zloděje a zároveň poskytovat estetický zážitek. Výzvou je navrhnout osvětlení tak, aby bylo působivé z různých úhlů a aby světelné zdroje byly skryty a neoslňovaly návštěvníky. Osvětlení stromů a rostlin může být realizováno různými způsoby, například osvětlením hmoty stromu, prosvětlením koruny nebo vytvořením siluety stromu proti světlému pozadí. Výběr metody a typu světla by měl zohlednit specifika stromu, jeho tvar, texturu a sezónní změny. Při výběru barevného osvětlení je třeba postupovat s citlivostí, aby výsledný efekt nebyl příliš teatrální. Moderní světelné technologie umožňují osvětlit nejen izolované stromy, ale i celé krajinné celky, přičemž je třeba zohlednit hlavní směr pohledu a minimalizovat rušivé světelné efekty.



Obr. 6. Osvětlování vzrostlé zeleně

26 Jiné možnosti

Různorodost architektonických forem objektů, nová stavební řešení a nové materiály vyžadují i rozmanitost a kreativitu výtvarného ztvárnění návrhu osvětlení. Noční vzhled budovy může být stejně důležitý jako její vzhled ve dne. Koncept architektonického osvětlení tak musí být úzce propojen s architektonickým řešením exteriéru budovy a bez spolupráce architekta není často možné dosáhnout uspokojivého výsledku. Při projektových studiích novostaveb je výhodné uvažovat o nočním vzhledu objektu již na začátku. Včasná projektová příprava umožňuje nejen úspory nákladů, které by musely být nutně zvýšeny, pokud by se osvětlovací soustava dodávala k hotovému objektu dodatečně, ale také umožňuje kreativnější řešení, které lze lépe sladit s architekturou budovy a jejími stavebními konstrukcemi.

Aktuální stav vývoje světelných zdrojů, svítidel a osvětlovacích zařízení poskytuje široké pole pro kreativní řešení výtvarného i technického návrhu architektonického osvětlení. Svítidla mohou být například vestavěna přímo do obvodového pláště budovy. Můžou být instalována ve sloupech zábradlí balkonů, madlech nebo v nadpražích průběžných lodžii, mohou být součástí říms nebo jiných výstupů, mohou také tvořit samostatné tvarové prvky fasády. Velké skleněné plochy umožňují širší využití projekční a promítací techniky (zadního promítání), hladké plochy mohou sloužit pro světelné kinetické obrazy (Monzer, 1980).



Obr. 7. Příklad osvětlení fasády budovy

27 Zasklené plochy

Zasklené plochy jsou pro mnoho budov důležitou součástí obvodového pláště a architektonického výrazu. Při řešení problémů spojených s osvětlením se obvykle setkáváme s třemi různými situacemi. Budovy s klasickým charakterem mají pevné průčelí, obvykle z materiálů s matným povrchem, a mohou tedy být osvětleny světlomety z okolí i zblízka. Osvětlení oken a zasklených dveří u těchto objektů je často pouze součástí celkového plánu architektonického osvětlení, který má za cíl přispět k působivému dojmu. Situace je odlišná u objektů současné architektury, jejichž obvodový plášť tvoří kombinace zasklených ploch (oken a dveří) a výplňových ploch z lesklých materiálů, jako jsou kovy, opoxidové sklo atd. Tyto budovy se nejčastěji používají jako administrativní budovy, hotely, služební objekty atd. a osvětlení jejich zasklených otvorů je často jedinou technickou i ekonomicky přijatelnou možností, jak průčelí zvýraznit světlem po západu slunce. Třetím případem jsou budovy, jejichž průčelí je téměř nebo úplně zasklené.

Okna v klasických budovách bývají důležitou součástí architektonického výrazu a jejich osvětlení může významně zlepšit jejich vzhled po západu slunce. Neladění a neosvětlená okna vyvolávají subjektivní pocit, že budova je mrtvá, a nahodilé osvětlení některých oken může negativně ovlivnit celkový efekt architektonického osvětlení. Pokud je budova osvětlena soustavou světlometů, světlo dopadající na okna prochází sklem, což způsobuje, že zasklené plochy jsou ve srovnání s ostatními povrchy tmavé. Proto je třeba řešit osvětlení oken samostatně. Nejjednodušší řešení je využít částečně nebo úplně osvětlení interiéru. Tím se vytvoří přirozený dojem z venku a budova působí jako živá. Navíc trvalé osvětlení interiéru má často i jiný význam, jako je například bezpečnost, jako je tomu v případě obchodních center, objektů služeb, bank, administrativních budov apod (Monzer, 1980).



Obr. 8. Příklad osvětlení prosklených fasád budovy

28 Velkoformátová projekce v architektuře

Současná architektura neustále hledá nové způsoby, jak oslovit diváka a jak přidat nový rozměr k existujícím strukturám. Jedním z těchto nových způsobů je využití velkoformátových projekcí. Tyto projekce představují revoluční krok v oblasti venkovních vizuálních zážitků a představují nové možnosti v oblasti architektonického osvětlení.

Základem těchto projekcí jsou výkonné projektory. Tyto projektory, vybaveny technologií filmu, umožňují vytvoření živých, dynamických a poutavých obrazů na různých površích. Díky nim mohou architekti a designéři experimentovat s různými vizuálními efekty a vytvářet úchvatné vizuální zážitky.

Ačkoliv je koncept venkovní projekce stále relativně nový, již se začíná výrazně etablovat v oblasti architektonického osvětlení. Těchto projekcí lze využít k osvětlení různých architektonických objektů, od historických památek až po moderní budovy. Často jsou součástí různých kulturních a uměleckých akcí, kde jsou kombinovány s jinými efekty, včetně zvuku, což vytváří komplexní smyslový zážitek pro diváky.

Velkoformátové projekce v architektuře představují bouřlivý vývoj v oblasti architektonického osvětlení, otevírají nové možnosti pro interakci s diváky a poskytují nástroj pro přetváření a reinterpetaci stávajících struktur. Jejich rostoucí popularita a technologický pokrok v oblasti projekční technologie naznačují, že tato metoda osvětlení bude i nadále hrát klíčovou roli v budoucím vývoji architektonického designu.

Příkladem využití velkoformátové projekce může být město Chicago, známé svým bohatým architektonickým dědictvím a inovačním přístupem k umění a designu, se může pochlubit jedním z nejambicióznějších projektů venkovního osvětlení na světě: velkoformátovou projekcí na historické budově theMART.



Obr. 9. Příklad osvětlení prosklených fasád budovy

3 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část mé disertační práce je zaměřena na novátorský přístup k simulaci architektonického osvětlení fasád budov. Tento inovativní postup představuje alternativu k tradičním, časově i finančně náročným metodám, které vyžadují komplikovanou instalaci skutečných světel na fasádu.

Tradiční postup zkoušení osvětlení na fasádě je totiž mimořádně náročný jak z hlediska pracovních úkonů, tak z hlediska logistiky. Obvykle vyžaduje umístění světel na fasádu z plošiny a jejich provizorní ukotvení. K tomu je nutné přivést potřebné napájení pro světla, což může být v mnoha případech obtížné a komplikované.

Můj výzkum nabízí inovativní alternativu v podobě využití videoprojekce na reálnou fasádu budovy. Tento přístup umožňuje rychlou a jednoduchou simulaci a testování různých variant osvětlení bez nutnosti instalovat reálná světla na fasádu.

Tyto simulace představují nástroj pro testování různých scénářů osvětlení. Umožňují snadné změny typu světel, jejich umístění, barevnosti a intenzity světla. Tato flexibilita přináší mimořádné výhody pro výběr nejefektivnějšího a nejvhodnějšího řešení pro danou budovu.

Celkově tedy praktická část mé disertační práce demonstruje novou metodu v oblasti simulací architektonického osvětlení a představuje základ pro budoucí výzkum a aplikace těchto technologií.



Obr. 10. Příklad montáže osvětlení na budovu

31 Popis metody

První krok v praktické části mé disertační práce bylo nezbytné identifikovat vhodný objekt pro testování nově vyvíjeného přístupu k simulaci architektonického osvětlení. Výběrová kritéria pro tento objekt byla pečlivě stanovena tak, aby poskytla optimální podmínky pro testování a zároveň umožnila dosažení objektivních a přesných výsledků.

Jedním z klíčových kritérií byla barva fasády objektu, která měla být světlá, aby umožnila dobrou reflexi video projekcí. Takováto světlá barva fasády rovněž minimalizuje riziko barevné deformace světla, což je důležité pro dosažení kvalitního a přesného obrazu.

Dalším důležitým faktorem byla struktura fasády objektu. Fasáda měla obsahovat dostatečný počet volných ploch pro nasvětlování, které by umožnily testování různých variant osvětlení. Toto členění fasády je klíčové pro efektivní aplikaci nového přístupu k simulaci architektonického osvětlení.

Kromě toho bylo také nutné zohlednit případné rušivé elementy, které by mohly ovlivnit kvalitu simulace. Těmito elementy mohou být například okolní objekty nebo stromy, které by mohly zasahovat do výhledu na testovanou budovu a tím pádem narušovat průběh testování.

Po důkladném zvážení všech těchto faktorů byla jako vhodný objekt pro testování vybrána historická budova A Fakulty stavební VUT v Brně. Tento výběr byl motivován několika faktory. Budova je architektonicky zajímavá a má důležitý význam, což přispívá k reprezentativnosti výsledků. Navíc se nachází na frekventované silnici, což umožňuje testování v různých světelných a provozních podmínkách.

32 Zaměření budovy a tvorba 3D modelu

Model z 2D dokumentace

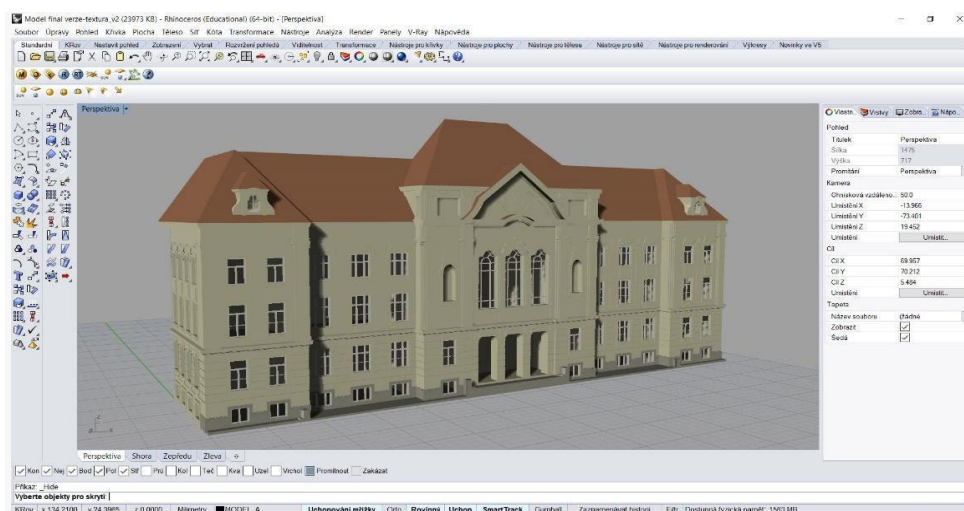
Vzhledem k nedostatečným výsledkům původně zamýšlené metody laserového skenování budovy jsem se rozhodl vytvořit 3D model budovy na základě dostupné 2D dokumentace. Tato dokumentace byla vytvořena v softwaru AutoCAD, který je široce uznávaným nástrojem pro tvorbu přesných technických výkresů a plánů.

Následně byl na základě této dokumentace vyhotoven výsledný 3D model budovy v programu Rhinoceros, což je specializovaný software pro 3D modelování, který se vyznačuje širokým spektrem funkcí a možností, včetně možnosti vytvoření detailních a přesných modelů budov a dalších architektonických prvků.

Proces modelování zahrnoval značnou časovou náročnost. Samotné vytvoření modelu trvalo přibližně 50 hodin. Tento čas zahrnoval úpravu zdrojových dat a vlastní tvorbu modelu. Byl to velmi detailní a precizní proces, který vyžadoval pečlivou pozornost k detailům a přesnost.

Rozhodl jsem se pro tento postup, protože v porovnání s metodou laserového skenování poskytoval lepší kontrolu nad výsledným modelem a umožňoval větší přesnost a detail. Navíc, tato metoda se ukázala jako flexibilnější vzhledem k možnosti dalších úprav a optimalizací modelu.

Konečný 3D model budovy tedy nyní představuje přesný a detailní základ pro naše další práce a experimenty se simulací osvětlení fasády. Díky tomu jsme schopni provádět realistické simulace různých variant osvětlení, a tak vyhodnotit neefektivnější a nevhodnější řešení pro danou budovu.



Obr. 11. 3D model v programu Rhinoceros

33 Práce s 3D modelem – osvětlování

Výběr vhodného softwaru

Při výběru softwaru pro práci s osvětlením 3D modelu jsem zvážil několik kritérií. Přednost jsem dal programům, které již ovládám, jakými jsou například 3Ds Max nebo Rhinoceros. Tyto programy poskytují možnost umístit požadovaná světla do modelu a nastavit jim specifické parametry. Avšak, jejich možnosti pro přesné nastavení parametrů světel byly omezené, což by mohlo vést k nedostatečné věrohodnosti a přesnosti simulovaného osvětlení.

Proto jsem po důkladné rešerši dostupných programů dospěl k rozhodnutí použít profesionální software DIALux EVO, který je celosvětově považován za nejlepší nástroj pro práci s osvětlením. Tento software nabízí širokou knihovnu světel, které jsou dostupné na trhu, a pro každé světlo jsou přednastaveny specifické parametry, jako je svítivost, vyzařovací úhly, barva světla a podobně.

Díky použití DIALux EVO jsem byl schopen dosáhnout velmi přesného podání světla na modelu, což umožnilo realistické simulace různých variant osvětlení. Software rovněž poskytuje užitečné analytické nástroje, které umožňují shromažďovat a vyhodnocovat rozsáhlé množství údajů o světle a jeho vlivu na modelovanou budovu.

Jeho použití mi tak umožnilo nejen přesně simulovat různé varianty osvětlení, ale také provádět detailní analýzu jejich výsledků a efektů, což je klíčové pro úspěšnou realizaci mého projektu. Toto opět potvrzuje důležitost volby vhodného softwaru pro specifické účely a potřeby mého výzkumu.

Import modelu a materiálů

Abych mohl vymodelovaný model z programu Rhinoceros použít v programu DIALux, musel jsem nejprve vyřešit problém s formátem souboru. DIALux totiž nepodporuje přímo formát .3dm, který je nativní pro Rhinoceros. Bylo tedy nutné model převést do formátu .3ds, který je v DIALuxu podporovaný.

Při tomto kroku bylo důležité upravit model tak, aby jeho jednotky odpovídaly metrům. Tento upravený model jsem poté importoval jako objekt do DIALuxu.

Po úspěšném importu jsem musel model natexturovat. V DIALuxu je k dispozici knihovna materiálů, ze které lze vybírat různé typy textur. Pro můj model jsem si zvolil textury, jejichž barevnost co nejvíce odpovídala reálným fotografiím budovy, aby výsledný model co nejvíce odpovídal realitě.

Tento proces byl poměrně náročný a časově nákladný, ale klíčový pro dosažení vysoké míry realismu simulací osvětlení. Prostřednictvím tohoto postupu jsem se také více seznámil s možnostmi a omezeními programu DIALux, což mi poskytlo cenné zkušenosti pro další fázi mého výzkumu.

Výběr a umístění světel

Další fází mého výzkumu byla volba vhodných světel pro budovu. Představovalo to důležitý krok, protože charakteristika světel výrazně ovlivňuje výsledný efekt osvětlení. Po pečlivém zvážení všech možností jsem zvolil světla společnosti ERCO. Tato firma je jedním z předních světových výrobců světel a vyniká zejména vyspělou technologií optických čoček. Ty umožňují přesné směřování světla bez parazitního osvětlení a ztráty výkonu.

Při výběru konkrétního typu světla jsem bral v úvahu různé parametry, jako jsou svítivost, úhel vyzařování a stupěň krytí IP. Po zvážení těchto faktorů jsem nakonec zvolil model ERCO Gecko Projector 1xLED 18W. Jedná se o malé, kompaktní světlo, které je ideální pro venkovní použití. Jeho vyzařovací úhel je ideální pro nasvětlení dlouhých a úzkých pásů, což je pro fasádu budovy velmi vhodné. Malý rozměr světla navíc umožňuje jeho umístění na římsy budovy bez rušení architektonických prvků.

Tato volba byla důležitou součástí mého výzkumu a umožnila mi následně se zaměřit na simulaci různých variant osvětlení budovy s pomocí tohoto konkrétního typu světla.

Vizualizace nasvícení modelu

Následujícím krokem v mé práci bylo vytvoření vizualizací nasvícení modelu. Po umístění světel jsem se zaměřil na nastavení kamery, která měla simulovat polohu a optické parametry reálných projektorů. Tento proces byl klíčový pro dosažení co nejreálnějšího podání nasvícení budovy.

S modely, světly a kamerami připravenými, bylo na řadě renderování. Renderování je proces, který přeměňuje 3D model a světla do konečného obrazu, který co nejvíce odpovídá tomu, jak by vypadalo nasvícení v reálném světě. Renderování je náročné na procesor a čas, ale je nezbytné pro dosažení věrohodných výsledků.

Výsledkem tohoto kroku byly obrázky nasvícení budovy. Tyto obrázky jsem poté aplikoval na reálnou fasádu budovy. Tento postup mi umožnil posoudit, jak by se vybraná světla a jejich umístění projevovala na skutečné budově a umožnila mi porovnat různé varianty nasvícení. Toto porovnání bylo nezbytné pro konečné rozhodnutí o nejlepší variantě osvětlení budovy.



Obr. 12. Vizualizace světel v programu DIALux evo

Aplikace na fasádu

Při aplikaci na fasádu využívám technologii videomappingu, která umožňuje přesné přizpůsobení obrazu skutečné budově. Tento proces vyžaduje využití výkonných dataprojektorů. Jejich počet a umístění je třeba předem vypočítat a závisí to na několika faktorech, včetně velikosti fasády, okolních světelných podmínek a vzdáleností mezi projektorem a fasádou.

Dataprojektory je nezbytné pevně zakotvit, aby nedocházelo k posunům v obraze, které by mohly narušit přesnost videomappingu a způsobit zkreslení. Z toho důvodu je klíčové se předem ujistit, že jsou projektorové stojany stabilní a bezpečné.

V rámci tohoto procesu je také důležité počítat s možnými změnami světelných podmínek, jako je například počasí nebo denní doba. Pro dosažení nejlepších výsledků je obvykle nejlepší počkat na setmění, kdy se zmenší okolní světlo a fasáda budovy se stane optimálním plátnem pro projekci.

Všechny tyto faktory je třeba zohlednit při plánování videomappingové projekce, a to jak z hlediska technického, tak i estetického. Předem je také důležité ověřit, že projekce nebude narušovat okolní prostranství, například oslňováním kolemjdoucích nebo rušením okolních budov.

34 Testování na modelu

Tvorba fyzického 3D modelu

K testování metody v kontrolovaných podmínkách jsem potřeboval vytvořit fyzický 3D model fasády budovy. Po důkladném zvážení dostupných technologických řešení jsem zvolil technologii 3D tisku jako tu nejvhodnější pro tento účel. Stavebnici tiskárny Prusa I3 MK2 jsem vybral na základě její prověřené spolehlivosti a dostupnosti na trhu.

Po příchodu stavebnice jsem se pustil do jejího sestavování. Proces byl značně náročný na čas a vyžadoval důkladnou práci s návodem, ale nakonec jsem byl schopen tiskárnu úspěšně sestavit a připravit k tisku.

Při vytváření modelu jsem musel rozhodnout o jeho měřítku. Vybral jsem měřítko 1:100, což bylo dostatečné pro účely mého testování a zároveň se vešlo po částech do tiskového prostoru tiskárny.

Z důvodu velikosti modelu jsem musel design rozdělit na 20 samostatných částí, které bylo možné vytisknout zvlášť a poté je složit dohromady. Tento proces byl značně časově náročný - samotný tisk modelu zabral přes 140 hodin.

Nicméně, celý proces byl velmi poučný. Dozvěděl jsem se mnoho o omezeních a možnostech 3D tisku a získal jsem cenné praktické zkušenosti, které mi pomohou při budoucích projektech. Navíc, fyzický 3D model mi poskytl možnost detailněji prozkoumat a porozumět fasádě budovy a jejím specifickým vlastnostem, což je klíčové pro úspěšné osvětlení a simulaci osvětlení budovy.

Testovací projektor

K realizaci testovacích úloh na modelu budovy jsem nepotřeboval speciální vysoce výkonný projektor - pro mé účely postačoval běžný kancelářský model. Z ústavu, kde provádím výzkum, jsem si zapůjčil projektor BenQ MW663. Tento projektor dosahuje svítivosti 3000 ANSI a rozlišením 1280x800, což jsou parametry více než dostačující pro moje potřeby.

Jednou z nezbytných podmínek při testování bylo umístění projektoru kolmo naproti modelu. Tímto způsobem jsem zajistil, že obrazová projekce byla co nejvíce konzistentní a pokrývala celý povrch modelu. Čočka projektoru byla orientována tak, aby směřovala přímo na střed modelu, což pomohlo minimalizovat možné deformace obrazu způsobené perspektivními zkresleními.

Dalším krokem v mé práci bylo vytvoření testovacího scénáře, který by umožnil detailně ověřit funkčnost a přesnost našeho modelu a metody simulace osvětlení. K tomu jsem použil vytvořený 3D model a projektor. Výsledky tohoto testování mi poskytly cenné poznatky a ujištění o tom, že náš model a metoda simulace osvětlení jsou dostatečně přesné a spolehlivé pro další použití.

Software

Pro úspěšné napasování projekce na fyzický model budovy bylo nezbytné pečlivě vybrat mappovací software, který by dokázal splnit všechny specifické požadavky tohoto projektu. Z mého předchozího zkušeností a po důkladné úvaze jsem se rozhodl použít software Resolume Arena 4. Tento software jsem měl možnost využít již v několika předchozích projektech, díky čemuž jsem se s ním naučil efektivně pracovat.

Resolume Arena 4 nabízí široké možnosti pro přehrávání vložených videí a obrázků, přičemž umožňuje flexibilní deformace těchto médií na výstupu. Jeho intuitivní uživatelské rozhraní a rozsáhlé funkční možnosti činí z Resolume Arena 4 ideální nástroj pro naše potřeby. Může efektivně napasovat projekce na jakoukoli povrchovou strukturu, což je v našem případě klíčové pro model budovy.

Navíc, s ohledem na mé předchozí zkušenosti s tímto softwarem, jsem měl jistotu, že budu schopen ho použít co nejefektivněji. To mi dávalo sebevědomí v úspěšnou realizaci tohoto projektu.

Následoval proces přípravy a testování našeho mappovacího software a vyhodnocení jeho použitelnosti v kontextu našeho projektu. Toto ověření bylo důležité pro další pokrok v mém výzkumu a pro potvrzení, že náš přístup k simulaci architektonického osvětlení fasád budov je správný a přesný.

Mappování projekce

Pro dokonalé napasování obrázku na reálnou fasádu budovy je nezbytné vytvořit takzvanou mappovací masku. Tato maska je 2D obrázkem, který zobrazuje hrany všech konstrukčních prvků fasády. S její pomocí se pak stává proces napasování obrázku na reálnou fasádu mnohem jednodušším.

Tuto mappovací masku jsem vytvořil a následně jsem ji importoval do programu Resolume Arena 4. Zde jsem pomocí funkce "advanced output" a deformační mřížky upravoval polohu a tvar obrázku, dokud neseseděl přesně s mappovací maskou na fyzickém modelu. Tento proces vyžadoval pečlivou práci a trpělivost, neboť každý detail měl zásadní vliv na celkový výsledek.

Jakmile jsem byl spokojen s výsledkem, mohl jsem pokračovat v testování. Podařilo se mi vytvořit vizuální projekci, která dokonale seděla na modelu budovy, což potvrdilo, že naše metoda je správná a věrohodná.

Výsledná projekce na model

Jakmile jsem dokončil proces mappování, bylo nutné v programu Resolume nastavit výstupní obrázek na námi vyrendrovaný model budovy s nasvícením. Tímto krokem se na fyzickém modelu začala vykreslovat simulace nasvícení budovy. Pozoroval jsem, jak se pozice a barvy světelných zdrojů na fasádě přizpůsobovaly modelu - detailně jsem sledoval přesnost i celkový vizuální dojem.

Nicméně, k dosažení nejlepších výsledků, bylo ještě nutné provést několik úprav. Konkrétně jsem musel upravit intenzitu projekce tak, aby odpovídala výkonu projektoru a svítivosti světelných zdrojů. Tímto způsobem upravený model by měl co nejvěrněji odpovídat reálným podmínkám.

Je důležité si uvědomit, že stejný postup lze aplikovat na skutečnou budovu s podobnými výsledky. Pro náš model jsme zvolili bílý materiál povrchu, a tak jsme tento materiál přiřadili také k našemu virtuálnímu modelu a promítali jsme barvu světla. V případě skutečné budovy bychom promítali reálnou barvu světla.

S tímto krokem jsem úspěšně dokončil testování naší nové metody na modelu. Další fáze výzkumu bude spočívat v aplikaci těchto technik na skutečné budovy, aby bylo možné ověřit, jak naše metoda funguje v praxi.



Obr. 13. Výsledná projekce nasvětlení na modelu

35 test na reálné fasádě

Poté, co jsem úspěšně testoval postupy na modelu, jsem dospěl k závěru, že je čas přesunout naše experimenty do reálného světa. Rozhodl jsem se tedy provést skutečný test nasvícení na fasádě budovy A na FAST.

Tento test v reálných podmínkách mi umožní ověřit, jak dobře se má metoda přenáší z teoretických a modelových podmínek do skutečného prostředí. Byl jsem si vědomý toho, že existuje mnoho proměnných, které nelze v laboratorních nebo modelových podmínkách plně simulovat - včetně faktorů, jako je okolní osvětlení, materiál fasády a mnoho dalších.

Abych mohl tento test provést, bylo třeba nejprve získat potřebné povolení a zabezpečit potřebné vybavení. Kromě toho jsem musel také pečlivě naplánovat test tak, aby zohlednil veškeré proměnné a faktory, které by mohly ovlivnit výsledky.

Příprava testu

Jako koordinátora testu mi připadla odpovědnost definovat klíčové parametry, jež by ovlivnily provedení mojí experimentální projekce. Tato definice zahrnovala především určení rozměru projekční plochy, optimalizaci umístění projektoru a analýzu intenzity okolního osvětlení.

Výběr části fasády

Prvním krokem v našem procesu přípravy byla pečlivá obhlídka budovy, aby bylo možné vybrat nejlepší část fasády pro náš test. Po důkladném zvážení všech možných lokalit, jsem se nakonec rozhodl pro pravou část budovy A (pohled od ulice Veveří). Tato konkrétní lokalita se ukázala být ideální z několika důvodů: fasáda je zcela nezakrytá, není obklopena žádným porostem a je dostatečný prostor pro umístění projektoru do optimální vzdálenosti od budovy.

Volba umístění projektoru

Další důležitou fází v přípravě testu bylo určit ideální umístění projektoru. Po pečlivém zvážení všech dostupných možností jsem se rozhodl pro chodník naproti fasádě. Toto místo bylo vybráno z několika důvodů: poskytuje přímý výhled na vybranou část fasády, je dostatečně vzdálené, aby bylo možné dosáhnout optimálního projekčního úhlu, a je také dostatečně volné od překážek, jako jsou stromy, lampy veřejného osvětlení a jiné možné překážky. S tímto umístěním jsem si byl jistý, že můj test bude co nejvíce přesný a věrohodný.

Stanovení projekční plochy

Velikost plochy na kterou můžeme promítat určuje světelný tok použitého projektoru.

Světelný tok, značený jako Φ , je měřen v jednotkách lumen (lm) a představuje celkové množství světla vytvářeného zdrojem, v našem případě projektoru. Intenzita osvětlení, značená jako E , je pak dána poměrem světelného toku (Φ) k ploše, na kterou světlo dopadá (A). Pro výpočet intenzity osvětlení se tedy používá vzorec $E = \Phi/A$. Výsledná intenzita je pak udávána v jednotkách luxu (lx) (ČERNÝ, 2007).

$$E = \frac{\Phi}{A}$$

Jednotkou osvětlení: lux [lx].

Projektor, který jsem zvolil, jako vhodný má světelný výkon 18 000 lm.

Vzhledem k tomu, že jsem pro tento test vybral projektor s vysokým světelným výkonem 18 000 lm, měl bych být schopen dosáhnout dostatečné intenzity osvětlení pro naši vybranou projekční plochu. Nyní je moje úloha vypočítat, jak velkou plochu můžeme efektivně osvětlit, aby byla projekce jasná a viditelná. Tento výpočet mi umožní nastavit správné parametry pro náš test a zajistit tak jeho úspěšné provedení.

Velikost projekce

Podle mých výpočtů a pečlivého posouzení potřebných parametrů, jsem stanovil, že testovací výsek fasády, na který budeme projekci realizovat, má šířku 18 metrů. U projektorů se často setkáváme s poměrem stran obrazu 16:9 nebo 16:10. Námi zvolený projektor má poměr 16:10, takže výška naší projekční plochy vychází na 11,25 metrů.

Zvolená projekční plocha má velikost 18x11,25 m

$$E = \frac{18\,000}{202,5} = 88,9 \text{ lx}$$

E = světelný výkon / celkovou plochou projekční plochy (ČERNÝ, 2007).

Nicméně je důležité vzít v úvahu i okolní osvětlení, které může na danou plochu dopadat. Pokud je okolní osvětlení nízké, průměrná hodnota osvětlení na plochu by měla být alespoň 200 luxů, s dolním limitem 50 luxů pro zachování dobře rozpoznatelného obrazu. Horní limit je kolem 800 luxů, kde začínají degradovat detaily v nejsvětlejších oblastech projekce.

Při permanentní instalaci projekce by bylo zásadní provést předem ověřovací zkoušku, která by potvrdila správnost těchto výpočtů a zajistila optimální viditelnost projekce v daných světelných podmínkách. V případě tohoto projektu je výkon našeho projektu udáván v ANSI lumenech, což je průměrný světelný tok naměřený na devíti definovaných místech projekční plochy. Přestože naše výpočty vypadají dobře, skutečná zkouška nám poskytne konečnou jistotu (ČERNÝ, 2007).

Zvolený projektor

Pro realizaci našeho testu jsem zvolil projektor M VISION s výkonem 18 000 lumenů. Tento model patří mezi vysoce výkonné projektory, které jsou ideální pro permanentní projekce. Jeho hlavní výhodou je laserový zdroj světla, který nabízí mimořádně dlouhou životnost až 20 000 hodin v provozu. Poměr stran projekce tohoto projektu je 16:10, což je pro naše potřeby ideální. Rozlišení projekce je WUXGA, tedy 1920x1200 pixelů, což je zcela dostačující pro pozorování z větší dálky.

Jako pomocný nástroj pro ověření mých výpočtů a pro výběr nejvhodnějšího objektivu pro projektor, jsem využil online kalkulátor na webových stránkách www.projectorcentral.com. Po zadání typu projektoru a požadované šířky projekce, mi kalkulátor pomohl zvolit optimální typ objektivu pro naši požadovanou odstupovou vzdálenost, která činí 32,4 metru.

Nakonec jsem zvolil zoomovací objektiv (DPZ 118-578) s nastaveným rozsahem zoomu 1,11x, který mi umožní na místě přesně nastavit požadovanou velikost projekce. Kalkulátor také potvrdil správnost naší zamýšlené velikosti projekce, která činí 18 x 11,25 metrů.

Tato pečlivá příprava a výběr správné technologie nám poskytuje silný základ pro úspěšné provedení našeho testu. Přestože výsledky výpočtů vypadají slibně, teprve skutečný test nám poskytne definitivní ověření správnosti našich předpokladů a rozhodnutí.

Stanovení míry svítivosti (jasu) z modelu

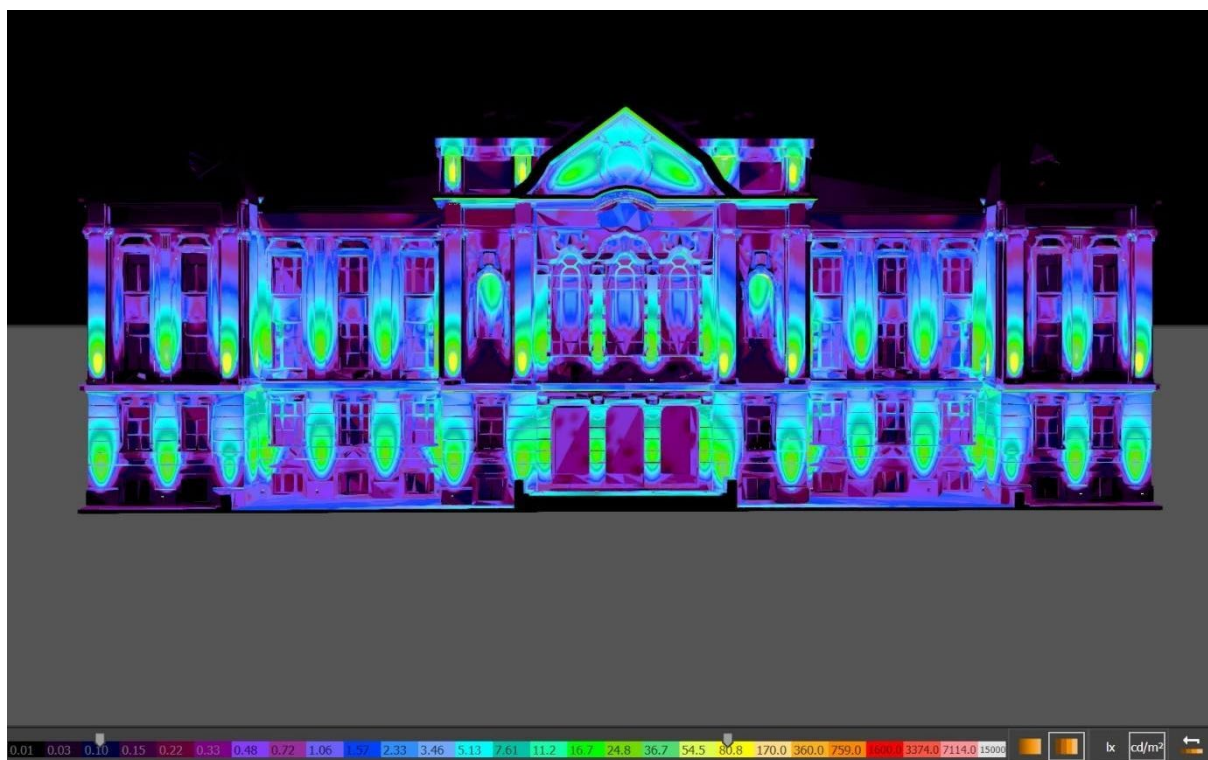
V rámci přípravy na náš test jsem v programu DIALux evo vytvořil simulaci jasové mapy na testované fasádě. Tato vizualizace barevně zobrazuje různé úrovně jasu na fasádě. Moje hlavní cíl bylo zjistit, jaké nejvyšší hodnoty jasu může průměrně osvětlená fasáda dosáhnout.

Výslednou jasovou mapu jsem pečlivě analyzoval a porovnal barvu reprezentující největší jas s hodnotovou lištou v programu. Z tohoto porovnání jsem zjistil, že nejvyšší intenzita jasu se pohybuje kolem hodnoty 24,8 cd/m². Druhá nejčastěji se vyskytující hodnota jasu se pohybovala kolem hodnoty 16,7 cd/m². Tím vznikl interval maximálního jasu 16,7 - 24,8 cd/m², kterého bych chtěl v praxi dosáhnout.

Jas značka L jednotka cd/m²

Jas je fotometrická veličina, definovaná jako míra svítivosti. Označuje se L (luminance), udává se v cd/m² (kandela na metr čtvereční). Charakterizuje schopnost svítící nebo světlo odrážející, případně propouštějící plochy vyvolat vizuální vjem. V podstatě jde o hustotu světelných paprsků (tj. svítivost) vztahující se na plochu (ČERNÝ, 2007).

Důkladné stanovení těchto hodnot je klíčové pro náš test, protože nám poskytuje konkrétní cíle, které bychom chtěli dosáhnout při realizaci projekce. To nám umožní přesněji posoudit úspěch našeho testu a také případně identifikovat oblasti, které by mohly vyžadovat další úpravy nebo optimalizaci.



Obr. 14. Simulace jasu v programu DIALux evo

36 Test v reálných podmínkách

Před testem

Před provedením samotného testu bylo nezbytné pečlivě vybrat vhodné umístění projektoru, aby bylo zajištěno, že nic nebrání výhledu na projekci. Ve většině případů je optimální umístit projektor na horizontální i vertikální střed projekční plochy. Ovšem v našem konkrétním případě, to nebylo možné realizovat kvůli specifickým podmínkám lokality. Proto jsem se rozhodl umístit projektor na chodník naproti zvolené fasádě, což představovalo projekci z pohledu.

Důležitým krokem bylo získání souhlasu od vedení školy pro svícení na budovu, což se nám podařilo bez jakýchkoli problémů. Dále jsme úspěšně vyjednali možnost vypnutí trvalého osvětlení školy. Bez tohoto kroku by bylo prakticky nemožné provést test, jelikož reflektory osvětlující naši cílovou fasádu by mohly výrazně ovlivnit výsledky.

Dalším kritickým aspektem přípravy bylo zajištění přívodu elektřiny pro projektor. Původně jsem uvažoval o napojení na elektřinu z budovy A, ale to se ukázalo jako nereálné kvůli frekventované komunikaci s tramvajovou linkou mezi místem projekce a budovou. Také alternativa napojení na elektřinu z přilehlého parkoviště se ukázala jako nerealizovatelná. Nakonec jsem se rozhodl pro nejjednodušší řešení - malou elektrocentrálu, která byla pro krátký test v řádu hodin zcela dostačující. Jedinou komplikací bylo, že při plném zatížení projektorem došlo k vypnutí jističe a centrála přestala fungovat. Bylo tedy nutné omezit plochu, na kterou jsme promítali, aby mohl test proběhnout. Přesto toto omezení nemělo vliv na konečné výsledky našeho testu.

Samotný test

Vybírání vhodného dne a času pro samotný test byla klíčovou složkou přípravy. Projekce byla nutno realizovat po západu slunce, za úplné tmy a za vhodného počasí. Dále jsme museli vzít v úvahu potenciální rušivé vlivy, jako je okolní doprava a pohyb lidí. Na naší straně byla v tomto případě situace kolem covidu na jaře 2020, kdy byl pohyb lidí v ulicích minimální a frekvence dopravy téměř nulová. Nakonec jsme se rozhodli pro termín 27. května 2020, kdy slunce zapadá v 20:45. S přípravou techniky na místě jsme začali v 20:30. Okolo 21:00 jsme byli připraveni a samotný test probíhal od 21:30 do 22:30 za ideálních světelných podmínek.

Nastavení projekce probíhalo podobně jako u projekce na testovací model, s tím rozdílem, že se jednalo o větší velikost projekce a výkonu samotného projektoru. Nejprve bylo nutné napozicovat svit projektoru na požadované místo projekce, což se realizovalo pomocí funkce lens shift, umožňující posun projekce horizontálně i vertikálně. Dále jsme zazoomovali projektor na požadovanou velikost pomocí zoomovacího objektivu. Nakonec bylo potřeba zaostřit projekci na fasádě, aby detaily promítaného obrazu byly ostré a dobře viditelné.

Po nastavení projekce jsme přistoupili k napasování video masky na skutečnou fasádu. K tomuto účelu jsme použili program Resolume Arena 4, který umožňuje deformování videoobrazu tak, aby přesně kopíroval tvar fasády. Video masku, vycházející z čelního pohledu na vybranou fasádu, jsem připravil předem na základě výkresů fasády, které jsem měl k dispozici. Tato video maska se skládá z obrysových linek konstrukčních prvků, jako jsou okna, sloupy a římsy. Tyto obrysové linie jsem následně napasoval na skutečné prvky fasády. Na základě této videomasky jsem si připravil testovací grafiku simulace nasvětlení fasády, kterou jsem vyexportoval z programu Dialux EVO. Jak videomaska, tak testovací grafika musely být stejných rozměrů a mít stejnou polohu.



Obr. 15. Fotodokumentace testu na fasádě

Vizuální působení projekce

Výsledná projekce na fasádu byla přesvědčivá, takže ani nenaznačovala, že se jedná o videoprojekci a ne o tradiční nasvětlení. Tento výsledek byl v mnoha ohledech úspěšným potvrzením účinnosti předchozích plánů a přípravy.

Barevnost světla v projekci byla také na věrohodná a odpovídala vizualizaci generované pomocí softwaru Dialux EVO. Tento aspekt byl obzvláště důležitý, protože přesné a věrné zobrazení barev je zásadní pro dosažení realistické projekce.

37 Měření testu

K měření testu na fasádě byl použit jasový analyzátor, který vyvinuly na Fakultě elektrotechnické VUT v Brně. Jedná se o moderní přístroj na bázi digitálního fotoaparátu a speciálního vyhodnocovacího software, který umožňuje provádět měření jasů a jeho distribuce v osvětlovacích soustavách, ale i obecně v jakémkoliv prostoru za účelem hodnocení vizuální záře, kvality osvětlení ale i jiných analýz navázaných na zjišťování distribuci jasu.

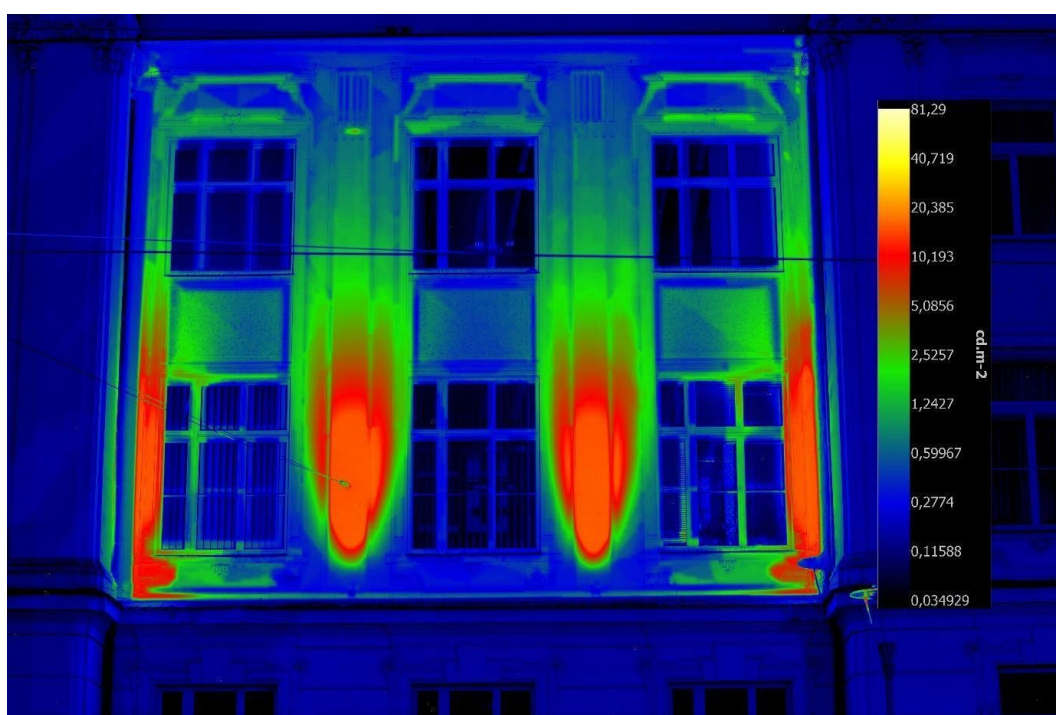
Měření jasovým analyzátozem provedl Ing. Jan Škoda Ph.D. a Ing. Jaroslav Štěpánek z Fakulty elektrotechniky VUT v Brně.

V první fázi měření jsme fotografovali fasádu bez projekce. Toto měření nám umožnilo získat jasovou mapu a definovat tak zdroje světla, které by mohly rušit samotnou projekci na fasádu. Z výsledků měření vznikl obrázek, kde byly jednotlivé hladiny jasu barevně rozlišeny. Závěrem jsme zjistili, že jas způsobený okolními zdroji světla činil přibližně $0,1\text{cd/m}^2$. Tato hodnota je nízká, což znamená, že fasáda je velmi málo ovlivněná okolními světelnými zdroji. Pro naše měření byla tato hodnota zanedbatelná.



Obr. 16. Jasová mapa bez projekce / FEKT VUT

Po zapnutí testovacího stavu projekce jsme provedli další měření jasové mapy. V tomto případě byly na výsledném obrázku dobře patrné velké rozdíly v naměřených jasech. Nejtmařejší části fasády byly zbarveny do tmavě modré barvy a nejsvětější části fasády byly zbarvené do červena až oranžova. Pro naše měření byla klíčová nejvyšší intenzita jasu, která díky projekci vznikla. Po odečtení nejjasnějších částí z obrázku jsme zjistili, že největší jas projekce činil kolem 18cd/m². Tato hodnota je na stejné úrovni, jako hodnota při simulaci.



Obr. 17. Jasová mapa projekce / FEKT VUT

38 výsledky disertační práce s uvedením nových poznatků, jejich analýza a jejich význam pro realizaci v praxi nebo pro další rozvoj oboru

Teoretická část

Nové poznatky: V rámci teoretické části mé práce jsem identifikoval několik klíčových poznatků. Prvním z nich je rozpoznání nedostatku a omezení současného vzdělávacího systému v České republice v oblasti světelného designu v architektuře. Tato mezera je překvapující, zejména s ohledem na význam světla v architektuře a stavebnictví.

Analýza: Díky hlubokému ponoření do teorie a srovnání s praktickými aplikacemi bylo možné identifikovat klíčové oblasti, které vyžadují další pozornost a výzkum. Moje analýza také ukázala, že kvalita světelného designu v praxi je často kompromisována kvůli komerčním tlakům, což zdůrazňuje potřebu vyššího vzdělání a odborného vedení v tomto oboru.

Význam pro realizaci v praxi a další rozvoj oboru: Získané poznatky a analýza mají hluboký význam pro praxi a budoucí rozvoj oboru světelného designu v architektuře. Upozorňují na potřebu zintegrování světelného designu do základního vzdělání architektů a stavebních inženýrů, aby se dosáhlo vyšší kvality staveb a vytvořilo se udržitelnější a člověkem orientované prostředí. Navíc, zdůrazněním významu této disciplíny v rámci vzdělávacího systému může dojít k posílení výzkumu, inovací a aplikací ve světelném designu na národní i mezinárodní úrovni.

Praktická část

Disertační práce, kterou jsem vypracoval, se v praktické části zabývala možností simulace architektonického svícení budovy pomocí videomappingové projekce. Tato práce je důležitá, neboť hledá alternativní metody vizualizace nasvícení budov ještě před samotným osazením světel. Výsledky práce nabízí nové pohledy a přístupy v oblasti architektonického svícení.

Nové poznatky:

- **Simulace svícení:** Softwarová simulace v programu DIALux evo nabízí spolehlivý a věrný obraz o tom, jak bude nasvícení v reálném prostředí vypadat. Díky možnosti exportu výpočtů hodnot jasu je tato metoda důležitým nástrojem pro porovnání se skutečným nasvícením.
- **Testování na modelu:** Vytvoření modelu skutečné budovy v menším měřítku poskytuje vizuální základnu pro pochopení, jak budou postupy fungovat v reálném měřítku.
- **Test na skutečné fasádě:** Aplikace teoretických poznatků na reálném objektu potvrzuje, že metody videomappingové projekce mohou být efektivně využity k simulaci architektonického osvětlení.

Analýza: Simulace v softwaru byla důležitá fází pro následnou aplikaci na modelu a skutečné budově. Skutečnost, že hodnoty jasu z reálného testu byly v souladu s hodnotami ze simulace, potvrzuje spolehlivost této metody. Výhody, jako je možnost vizualizovat několik variant osvětlení a schopnost adekvátně reagovat na nerovnosti fasády, zdůrazňují potenciál tohoto přístupu.

Význam pro praxi a rozvoj oboru: Praktický význam práce spočívá především v možnosti umožnit klientům vidět různé varianty nasvícení na skutečné fasádě ještě před tím, než se rozhodnou pro konkrétní osvětlení. Tím se zvyšuje úspora času a zdrojů a zmenšuje se riziko nespokojenosti s finálním výsledkem. Navíc, tato metoda může být zvláště užitečná v městských oblastech, kde je světelný smog často problémem, neboť videomappingem nevzniká světelný smog.

Z hlediska rozvoje oboru může tato práce inspirovat další výzkumy a experimenty, zejména v oblasti vylepšení videomappingových technologií, optimalizace softwarových simulací nebo zkoumání dalších aplikací v architektonickém osvětlení.

Zkrátka, tato disertační práce přináší inovativní přístup k architektonickému svícení, který má potenciál změnit, jak architekti a světelní designéři přistupují k osvětlování budov.

4 ZÁVĚR

V rámci teoretické části mé disertační práce jsem se podrobně ponořil do problematiky světla v architektuře. Tato komplexní teoretická příprava mi poskytla hluboký vhled do principů, technologií a aplikací světelného designu, což bylo zásadní pro realizaci praktické části mého výzkumu.

Díky grantu jsem měl možnost nahlédnout do zahraničních publikací, které se intenzivně zaměřovaly na světlo a jeho uplatnění v architektuře. Účastnil jsem se odborných konferencí, workshopů a zahraničních exkurzí, což mi umožnilo poznat nejnovější trendy, poznatky a inovace v oboru světelného designu.

V průběhu svého výzkumu jsem také pochopil, že přestože světlo v architektuře hraje klíčovou roli v estetice, funkčnosti a vnímání prostoru, vzdělání v této oblasti často chybí na mnoha školách architektury. Proto jsem se rozhodl promítnout své zkušenosti a poznatky do vytvoření předmětu "Světlo v architektuře", který má ambici poskytnout budoucím architektům a stavebním inženýrům základní a aplikované znalosti v oboru světelného designu.

Pokud jde o budoucnost oboru, je evidentní, že videomappingové projekce hrají stále významnější roli. Jejich nárůst v popularitě je do značné míry dán pokroky v projekční technice, která je dnes dostupnější, efektivnější a výkonnější. Stále více měst po celém světě objevuje kouzlo kombinace architektonického osvětlení a dynamických videomappingových projekcí, které umožňují transformovat fasády budov v živé plátna vyprávějící příběhy.

Vzhledem k těmto trendům lze předpokládat, že v budoucnu bude hranice mezi tradičním architektonickým osvětlením a videomappingovými projekcemi ještě více rozostřena. A právě zde vidím klíčový význam mé disertační práce – jako most mezi teoretickým porozuměním světla a jeho praktickým uplatněním v moderním městském prostředí.

Praktická část mé disertační práce představuje revoluční postup v oblasti architektonického svícení. Možnost simulovat nasvícení budovy skrze videomappingovou projekci nabízí unikátní, uživatelsky přívětivý a ekonomicky účinný způsob vizualizace. Díky tomuto postupu mohou architekti a designéři předvést klientům jak potenciální výsledek, tak i alternativní varianty nasvícení, a to vše ještě před samotnou instalací světel.

V průběhu výzkumu jsem potvrdil, že softwarová simulace poskytuje spolehlivé výsledky, což bylo následně demonstrováno reálným nasvícením. Toto zjištění má velký význam pro praxi: díky možnosti testování různých světelných scénářů na modelu či přímo na fasádě budovy můžeme optimalizovat návrh světelného řešení ještě před jeho realizací.

Tento nový přístup má potenciál řešit několik výzev spojených s architektonickým osvětlením, zejména v urbanizovaných oblastech, kde světelný smog představuje rostoucí problém. Díky použití videomappingové projekce ke simulaci osvětlení můžeme snížit světelný smog a přitom zajistit, že budovy budou osvětleny optimalizovaným a efektivním způsobem.

Měl jsem tu čest prozkoumat a prezentovat tento inovativní přístup v mé disertaci, a věřím, že mé závěry a zjištění posunou hranice možného v oboru architektonického osvětlení. V naději, že tato práce inspirovala a bude inspirovat další, předávám své poznatky do rukou odborné komunity s touhou vidět je aplikovány v reálném světě a přispět tak k vytváření vizuálně přitažlivých a udržitelných městských prostředí.

5 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

Použitá literatura:

MONZER, Ladislav. Venkovní osvětlení architektur. Praha: SNTL ISBN: 04-703-80

HABEL, Jiří. Světelná technika a osvětlování. Praha: FCC Public, 1995. ISBN 80-901-9850-3.

ČERNÝ, Jiří. Základy architektonického a scénického svícení 1.díl. Praha: Akademie múzických umění, Divadelní fakulta, 2002. ISBN 80-733-1906-3.

ČERNÝ, Jiří. Základy architektonického a scénického svícení 2.díl. Praha: Akademie múzických umění, Divadelní fakulta, 2007. ISBN 978-807-3310-783.

DESCOTTES, Hervé a Cecilia E. RAMOS. Architectural lighting: designing with light and space. New York: Princeton Architectural Press, c2011. Architecture briefs. ISBN 978-156-8989-389.

RUSSELL, Sage. The architecture of light: architectural lighting design concepts and techniques : a textbook of procedures and practices for the architect, interior designer and lighting designer. La Jolla: Conceptnine, 2008. ISBN 978-0-9800617-0-3.

KARLEN, Mark, James BENYA a Christina SPANGLER. Lighting design basics. Second Edition. Hoboken: Wiley, 2012. ISBN 978-047-0474-273.

Superlux: smart light art, design and architecture for cities. London: Thames and Hudson, 2015. ISBN 978-0-500-34304-3.

LOWTHER, Clare a Sarah SCHULTZ. Bright: architectural illumination and light installations. Amsterdam: Frame Pub., c2008. ISBN 978-389-9553-017.

GANSLANDT, Rüdiger a Harald HOFMANN. Handbook of Lighting Design. 1. Verlag Vieweg, 1992. ISBN 3-528-08895-8.

KARCHER, Aksel. Light perspectives: between culture and technology ; light, space, perspectives. Lüdenscheid: ERCO, 2009. ISBN 978-3-9813216-1-6.

Použité obrázky:

Obr.1. [online]. [cit. 2023-08-20]. Dostupné z:
<https://www.google.com/imghp?hl=cs&tab=ri&authuser=0&ogbl>

Obr.2. - 6. HUDEC, Roman. *Prezentace firmy ERCO.*

Obr.7. - 10. [online]. [cit. 2023-08-20]. Dostupné z:
<https://www.google.com/imghp?hl=cs&tab=ri&authuser=0&ogbl>

Obr.11. - 17. MACHÁT, Jan. *Grafický výstup autora*

PŘEHLED AKTIVIT VYKONANÝCH BĚHEM STUDIA V DOKTORSKÉM STUDIJNÍM PROGRAMU

Publikační činnost

2016

MACHÁT, Jan. Světelný design - úvod do problematiky. *ERA 21*. 2016, článek v tuzemském odborném časopise 2016, 2.

2017

MACHÁT, Jan. Simulace architektonického nasvícení budov. Juniorstav 2017-19. odborná konference doktorského studia, Brno, 2017, s.1-7. ISBN: 978-80-214-5462-0

2018

MAREŠ, Michal, Pavel SUCHAN, Jiří DUŠEK, Jan MACHÁT, KOLASA, Marek, ed. SVĚTLO. TMA. 2. Brno: Brno, 2018. Odborná publikace

2019

MACHÁT, Jan a Petr DÝR. Odborné architektonické exkurze: pozapomenutá významná česká a evropská architektura. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, Ústav architektury, 2019. ISBN 978-80-214-5789-8.

2019

GUZDEK, Adam a Jan MACHÁT. Architektonické prvky a detaily staveb poválečné architektury v Československu. 3. Brno, 2019. ISBN 978-80-214-5828-4.

Práce na projektech

2016

Tvůrčí práce studentů směřující k inovaci vzdělávací činnosti - Workshop aplikovaného světelného designu v architektuře

Řešitel - Ing. arch. Jan Machát

2019

Projekt SGS - Architektonické prvky a detaily staveb poválečné architektury v Československu - 3. kniha

Řešitelé - Ing. arch. Adam Guzdek, Ph.D., Ing. arch. Jan Machát

2019

Specifický výzkum - Odborné architektonické exkurze

Řešitelé - doc. Ing. arch. Petr Dýr, Ph.D., Ing. arch. Jan Machát

Absolvované zahraniční stáže:

2015

Studijní stáž KTH – Stockholm Švédsko,

Konference: Lighting Visions

Zkušenosti v oboru:

2011 - 2013 Olomouc

Festival světla Vzáří

Konference Světlo pro naše města

videomapping workshop

10/2013 - Praha

Konference Světlo pro naše města

Workshop - Architects of Light

12/2015 Studijní stáž KTH Stockholm

konference - Lighting Visions: Light, Space and Nature

2013-2018 JAMU kurzy oboru Světelný design

– workshop světelného designu Žďár na Sázavou

– workshop světelného designu JAMU

DOKUMENTACE INŽENÝRSKÝCH NEBO UMĚLECKÝCH DĚL

Studentem realizovaná díla v registru RUV (registr uměleckých výstupů)

Celkem 36 hodnocených děl.

Vybrané projekty:

Olomouc nasvícení radnice a sloupu Nejsvětější trojice

Návrh a realizace slavnostního nasvícení sloupu Nejsvětější trojice a radnice v Olomouci. Na realizaci byly použity nejmodernější LED svítidla firmy ROBE. Nasvícení se dynamicky měnilo na předem připravenou hudbu. Plošné nasvícení bylo realizováno výkonnými RGB LED WASH světly a doplněny výbojkovými SPOT světly a gobo filtry. Na nasvícení soch sloupu Nejsvětější trojice byly použity malé LED reflektory.



Obr. 1. Olomouc nasvícení radnice a sloupu Nejsvětější trojice

Nasvícení spalovny Brno

Návrh a realizace nasvícení spalovny Brno při příležitosti noci otevřených dveří. Realizováno bylo nasvícení exteriérů včetně komínu a interiéru. Na nasvícení fasád byly použity výkonné RGB LED Wash světla a na nasvícení komínu byly použity RGB LED pary s úzkým kuželem světla.



Obr. 2. Nasvícení spalovny Brno

Ples VUT

Celkový návrh interiéru a koncepce proměny výstavní plochy pavilonu P na plesový prostor. Návrh včetně stagedesignu, technického řešení, osvětlení, projekcí. Ples se stal největším plesem v Brně.



Obr. 3. Ples VUT

Stage festivalu Mácháč 2013

Návrh a realizace hlavní stage festivalu Mácháč. Zajištění realizace stavby unikátní stage na hladině Máchova jezera. Výroba animací a odbavení projekcí na akci.



Obr. 4. Stage festivalu Mácháč 2013

Stage festivalu Mácháč 2016

Návrh a realizace hlavní stage festivalu Mácháč. Zajištění realizace stavby unikátní stage na hladině Máchova jezera. Výroba animací a odbavení projekcí na akci.



Obr. 5. Stage festivalu Mácháč 2016

Hvězdárna Brno nasvícení budovy

Nasvětlení hvězdárny a planetária Brno při příležitosti zimního slunovratu. Na hudbu byla vytvořena světelná a videomappingová show.



Obr. 6. Hvězdárna Brno nasvícení budovy

Festival Planet Brno 2023

Tvorba nafukovacích planet pro Hvězdárnu a planetárium Brno. Práce na organizaci akce Festival Planet.



OBR. 1. HVĚZDÁRNA BRNO NASVÍCENÍ BUDOVY

Vodojemy na Žlutém kopci 2022

Návrh osvětlení dvou vodojemů na Žlutém kopci. Technický návrh osvětlení nejstaršího cihlového vodojemu a druhého vodojemu s rovnou podlahou. Oba vodojemy jsou osvětleny rozdílnou technikou, tak aby světla neoslňovala lidi a podpořila architekturu prostor.



Obr. 2. Vodojem na Žlutém kopci

Vodojemy na Žlutém kopci – festival Prototyp 2022

Osvětlení vodojemů v rámci uměleckého festivalu Prototyp. Technický návrh světelné techniky, práce na komponované hudbě.



OBR. 1. VODOJEM NA ŽLUTÉM KOPCI

ABSTRAKT

Disertační práce se zaměřuje na rozvoj a pochopení světelného designu v kontextu architektury.

Práce popisuje výzvy spojené s tradičními metodami osvětlení fasád a představuje inovativní alternativu v podobě videoprojekce. Tento přístup nabízí flexibilitu v testování různých scénářů osvětlení, snadnější změny v designu a efektivní výběr optimálního osvětlení pro konkrétní budovu.

Praktická část byla zahájena výběrem vhodného objektu, historické budovy A Fakulty stavební VUT v Brně, na základě pečlivě stanovených kritérií. Následovaly testy simulace v počítačovém prostředí a testy na zmenšeném modelu budovy, vytvořeném pomocí 3D tisku, před samotným testem na reálné budově.

Teoretická část práce zahrnovala studium odborné literatury, účast na konferencích a workshopech, studijní stáž ve Stockholmu a praktickou práci se světlem. Tyto zkušenosti posloužily jako základ pro potenciální výukový předmět "Světlo v architektuře", který by mohl být začleněn do výuky architektonického studia.

Celkově tato disertační práce přispívá k posílení teoretického i praktického porozumění světelného designu v architektuře a nabízí inovativní metody a postupy pro její aplikaci.

ABSTRACT

This dissertation focuses on the development and understanding of lighting design in the context of architecture.

The thesis describes the challenges associated with traditional methods of façade lighting and presents an innovative alternative in the form of video projection. This approach offers flexibility in testing different lighting scenarios, facilitating design changes and efficiently selecting the optimum lighting for a particular building.

The practical part started with the selection of a suitable building, the historic Building A of the Faculty of Civil Engineering of Brno University of Technology, based on carefully defined criteria. This was followed by simulation tests in a computer environment and tests on a scale model of the building, created using 3D printing, before the actual test on the real building.

The theoretical part of the work included studying literature, participation in conferences and workshops, a study internship in Stockholm and practical work with light. These experiences served as a basis for a potential teaching course "Light in Architecture" that could be incorporated into the architectural studio curriculum.

Overall, this dissertation contributes to strengthening the theoretical and practical understanding of light design in architecture and offers innovative methods and practices for its application.