



**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**F3**

**Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektrotechnologie**

**Bakalářská práce**

# **Příprava a studium fluorescenčních koncentrátorů**

**Štěpán Štafl**

**Elektrotechnika, energetika a management – Aplikovaná elektrotechnika**

**Praha 2022**

**Vedoucí práce: RNDr. Branislav Dzurňák, Ph.D.**



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Štafl** Jméno: **Štěpán** Osobní číslo: **491934**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Příprava a studium fluorescenčních koncentrátorů**

Název bakalářské práce anglicky:

**Preparation and study of fluorescent concentrators**

Pokyny pro vypracování:

Bakalářská práce je zaměřena na studium a přípravu fluorescenčních koncentrátorů na bázi organických barviv, pro využití ve fotovoltaice.

1. Nastudujte současný stav poznání a vybrané publikace z oblasti organických fluorescenčních koncentrátorů.
2. V experimentální části připravte vzorky roztoků a fluorescenčních kolektorů.
3. Charakterizuje spektrální vlastnosti (absorpční a fluorescenční spektrum) a zvolte vhodný postup vyhodnocení pravděpodobnosti reabsorpce.
4. Zvolte vhodnou teorii pro aproximaci a vyhodnocení optické účinnosti fluorescenčních koncentrátorů.

Seznam doporučené literatury:

- T. Markvart, L. Castaner, Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications, Elsevier Science, 2003
- J. Roncali, Luminescent Solar Collectors: Quo Vadis?, Advanced Energy Materials, 2020

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**RNDr. Branislav Dzurňák, Ph.D. katedra elektrotechnologie FEL**

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

Datum zadání bakalářské práce: **11.02.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

RNDr. Branislav Dzurňák, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_ Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_ Podpis studenta



## Poděkování / Prohlášení

Chtěl bych poděkovat vedoucímu  
mojí práce RNDr. Branislavu Dzurňá-  
kovi, Ph.D. za odborné vedení a věcné  
diskuze. Dále děkuji své rodině za pod-  
poru během mého studia.

Prohlašuji, že jsem předloženou prá-  
ci vypracoval samostatně a že jsem  
vedl veškeré použité informační zdroje  
v souladu s Metodickým pokynem o do-  
držování etických principů při přípravě  
vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne .....

.....

## Abstrakt / Abstract

Bakalářská práce se věnuje analýze fluorescenčních solárních koncentrátorů na bázi organických barviv. Úvodem je popsán současný stav poznání tohoto typu koncentrace a v experimentální části je provedena příprava několika koncentrátorů na bázi různých barviv, které jsou následně charakterizovány z hlediska jejich spektrálních vlastností. Ze změřených hodnot jsou vyhodnoceny ztráty reabsorpce uvnitř vzorků a je použit nový zjednodušený teoretický model pravděpodobnosti reabsorpce. Experimentálně zjištěné hodnoty jsou použity k vyhodnocení optické účinnosti připravených fluorescenčních koncentrátorů.

**Klíčová slova:** Fluorescenční solární koncentrátor, solární energie, pravděpodobnost reabsorpce, optická účinnost.

The bachelor thesis analyzes fluorescent solar concentrators based on organic dyes. The introduction describes the current state of knowledge of this type of concentration. Several concentrators based on different dyes are prepared and then characterized in terms of their spectral properties in the experimental part. Reabsorption losses are evaluated from the measured values, and a new simplified theoretical model for the probability of reabsorption is applied. Experimental values are used to evaluate the optical efficiency of the prepared fluorescent concentrators.

**Keywords:** Fluorescent solar concentrator, solar energy, probability of reabsorption, optical efficiency.

**Title translation:** Preparation and study of fluorescent concentrators

# Obsah /

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>		
<b>2 Současné poznání</b>	<b>2</b>		
2.1 Historický vývoj . . . . .	3		
2.2 Matrice LSC . . . . .	3		
2.3 Fotoluminiscenční emitory . . . . .	4		
<b>3 Teoretická část</b>	<b>5</b>		
3.1 Fluorescence . . . . .	5		
3.2 Optické vlastnosti LSC . . . . .	6		
3.2.1 Index lomu, Snellův zákon . . . . .	6		
3.2.2 Geometrický výtěžek, koncentrační faktor . . . . .	7		
3.3 Ztrátové procesy spojené s LSC . . . . .	7		
3.4 Spektroskopická měření . . . . .	8		
3.5 Lambert-Beerův zákon . . . . .	9		
3.6 Optická účinnost . . . . .	9		
3.6.1 Pravděpodobnost re- absorpce . . . . .	9		
3.6.2 Další ztráty . . . . .	10		
3.6.3 Účinnost kolekce . . . . .	11		
3.6.4 Účinnost absorpce . . . . .	11		
3.6.5 Výpočet optické účinnosti . . . . .	11		
<b>4 Praktická část</b>	<b>12</b>		
4.1 Použité přístroje . . . . .	12		
4.2 Příprava vzorků . . . . .	12		
4.2.1 Příprava roztoku . . . . .	12		
4.2.2 Nanášení roztoku . . . . .	14		
4.3 Měření . . . . .	15		
4.3.1 Měření absorpčních vlastností barviv a vzorků . . . . .	15		
4.3.2 Měření spekter 1. gene- race použitých barviv . . . . .	16		
4.3.3 Měření fluorescenčních spekter při celoplošném osvětlování vzorků . . . . .	17		
4.3.4 Měření fluorescenčních spekter při bodovém osvětlování vzorků . . . . .	18		
4.4 Výpočty a výsledky . . . . .	20		
4.4.1 Účinnost kolekce . . . . .	20		
4.4.2 Účinnost absorpce . . . . .	21		
4.4.3 Optická účinnost . . . . .	21		
4.5 Aproximace výsledků modelem . . . . .	22		
4.5.1 Aproximace pravděpo- dobnosti reabsorpce a účinnosti kolekce . . . . .	22		
4.5.2 Aproximace účinnosti absorpce . . . . .	23		
4.5.3 Aproximace celkové optické účinnosti . . . . .	24		
<b>5 Diskuze</b>	<b>25</b>		
<b>6 Závěr</b>	<b>28</b>		
<b>Literatura</b>	<b>31</b>		
<b>A Zkratky a symboly</b>	<b>35</b>		
<b>B Doplnující grafy</b>	<b>37</b>		
<b>C Seznam příložených souborů</b>	<b>40</b>		

## Tabulky / Obrázky

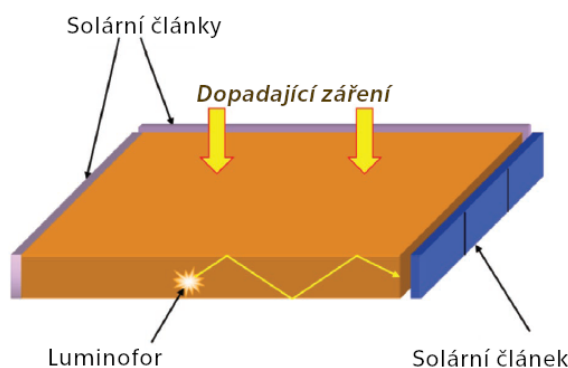
<b>4.1</b> Použité přístroje .....	12	<b>1.1</b> Principiální schéma LSC.....	1
<b>4.2</b> Vypočtené hodnoty pro přípravu roztoků .....	13	<b>2.1</b> Spektrální odezva různých technologií PV článků.....	2
<b>4.3</b> Vypočtené hodnoty pravděpodobnosti reabsorpce při osvětlení bílým světlem a Stokesův posun .....	18	<b>2.2</b> LSC s použitím různých fluorescenčních organických barviv ..	3
<b>4.4</b> Vypočtené hodnoty pravděpodobnosti reabsorpce při osvětlení laserem .....	19	<b>3.1</b> Absorpční spektrum a spektrum 1. generace barviva Coumarin 314 .....	5
<b>4.5</b> Vypočtené hodnoty účinnosti kolekce .....	20	<b>3.2</b> Lom světla na rozhraní dvou prostředí .....	6
<b>4.6</b> Vypočtené hodnoty účinnosti absorpce .....	21	<b>3.3</b> Ztrátové procesy spojené s LSC .....	7
<b>4.7</b> Vypočtené hodnoty optické účinnosti.....	21	<b>3.4</b> Grafické znázornění výpočtu reabsorpce .....	10
		<b>4.1</b> Připravené vzorky LSC .....	14
		<b>4.2</b> Uspořádání měření absorpčních spekter .....	15
		<b>4.3</b> Absorpční a emisní spektra použitých organických barviv ..	16
		<b>4.4</b> Uspořádání měření emisních spekter.....	17
		<b>4.5</b> Spektra okrajové fluorescence vzorků s barvivem Lumogen Orange 240 při osvětlování laserem .....	19
		<b>4.6</b> Pravděpodobnost reabsorpce vzorků při osvětlování laserem .	19
		<b>4.7</b> Aproximace změřených hodnot pravděpodobnosti reabsorpce .....	23
		<b>4.8</b> Aproximace změřených hodnot optické účinnosti.....	24
		<b>5.1</b> Znázornění průměrné optické dráhy při bodovém ozařování laserem .....	26
		<b>B.1</b> Absorbance jednotlivých vzorků LSC.....	37
		<b>B.2</b> Emisní spektra vzorků při osvětlování bílým světlem.....	38
		<b>B.3</b> Aproximace změřených hodnot pravděpodobnosti reabsorpce pro jednotlivá barviva ..	39



# Kapitola 1

## Úvod

Luminiscenční (též fluorescenční) solární koncentrátory (LSC) jsou již přibližně čtyři desetiletí předmětem výzkumu a počet článků o tomto tématu v průběhu posledních několika let vzrostl. První koncept byl popsán již v roce 1973 [1–2]. V současné době snahy omezit využívání neobnovitelných zdrojů je solární energie jednou z možných nízkoemisních alternativ. S použitím LSC ve fotovoltaických (PV) systémech by mohlo dojít ke zvýšení jejich účinnosti a ke snížení spotřeby křemíku.



**Obrázek 1.1.** Principiální schéma LSC. [3] (upraveno)

LSC je optické zařízení pro koncentraci dopadajícího slunečního záření. Díky jednoduchému principu je možné vyrobit různé tvary koncentrátorů a použít různá fluorescenční barviva. Způsob koncentrace spočívá v absorpci přímého i difuzního záření dopadajícího na poměrně velkou plochu koncentrátoru ve vrstvě s fluorescenčním barvivem, a poté generování přeměněného fluorescenčního záření do náhodných směrů. Vlivem vyššího indexu lomu matrice LSC než okolního vzduchu dochází k úplným odrazům záření v objemu LSC a koncentraci světla do relativně malé plochy na menších stěnách koncentrátoru. Na tyto stěny je možné umístit PV články, které budou energii z koncentrovaného záření přeměňovat na energii elektrickou [3]. Principiální schéma LSC je na obrázku 1.1. S použitím LSC ve více vrstvách s různými barvivy je možné separovat světlo a přizpůsobit luminiscenční světlo připojeným PV článkům [4].

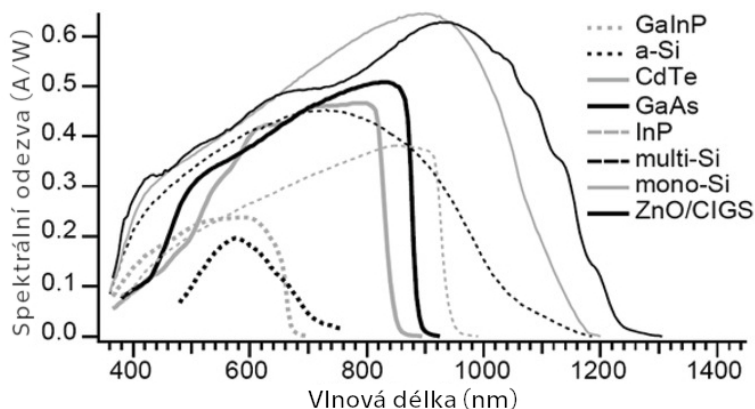
Provedení LSC může být různé. V posledních několika letech je věnována pozornost tenkovrstvým LSC, které dosahují dobrých vlastností a jejichž výroba je snadná. Jedním z cílů této práce je vytvoření několika vzorků LSC s použitím skleněných laboratorních sklíček, na které bude nanášena tenká vrstva luminiscenčního organického barviva.

Jedním z problémů spojených s LSC je jejich poměrně nízká optická účinnost, jejíž výpočet je netriviální. Dalším cílem této práce bude najít vhodný způsob, jakým výpočet provést. Před tímto krokem bude nezbytné vytvořit sadu vzorků LSC a zvolit vhodné metody pro určení ztrátových procesů – zejména pravděpodobnosti reabsorpce, která se na nízké hodnotě optické účinnosti podílí nejvíce [3].

## Kapitola 2

### Současné poznání

Výzkum a vývoj v oblasti fotovoltaické konverze solární energie byl a stále je intenzivní. PV články na bázi krystalického křemíku (c-Si) dnes již dosahují efektivní alternativy ke zdrojům, které jsou závislé na neobnovitelných zdrojích. Vývoj c-Si článků je paralelně doprovázen vývojem dalších technologií. Konkrétně lze zmínit například barvivem senzitivované články (DSSC), tenkovrstvé články (na bázi CIGS, CdTe, a-Si), organické články nebo perovskitové články. Tyto alternativy mohou potenciálně snížit cenu PV článků, omezit dopad na životní prostředí během životního cyklu a mít vyšší účinnost. Přesto nyní převažuje i z ekonomických důvodů v ČR technologie monokrystalických (mono-Si) a multikrystalických (multi-Si) křemíkových modulů – v roce 2015 byl podíl těchto modulů v ČR přibližně 85 % [5]. V současné době tento podíl bude pravděpodobně okolo 95 %, což kopíruje i celosvětový trend [6].



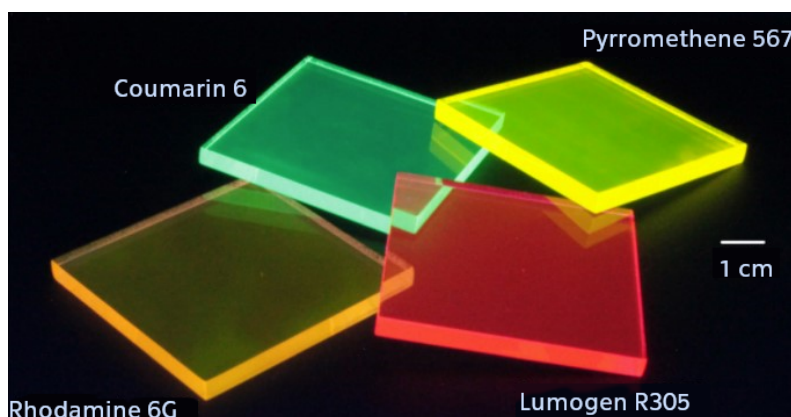
**Obrázek 2.1.** Spektrální odezva různých typů PV článků. [3] (upraveno)

Snížení ceny PV systémů lze dosáhnout také koncentrací slunečního světla. Systémy pro koncentraci slunečního záření s využitím zrcadel již byly v některých aplikacích využity. Hodí se zejména do velmi slunných lokalit, protože nedokáží efektivně využít difuzní záření. Jejich nevýhody jsou především ve složitější konstrukci, údržbě a chlazení. Další problémy mohou nastat s vyšší pořizovací cenou a nutností natačecího systému pro sledování polohy slunce [7].

Možnou alternativou k zrcadlovým koncentrátorům jsou LSC. V porovnání se zrcadlovými systémy mají několik výhod. Díky nízké závislosti na směru dopadajícího záření není potřebný natačecí systém a jejich výrobní cena je nízká. Výhodou je také účinná koncentrace difuzního světla, díky čemuž jejich potenciální využití může být v oblastech s vyšší oblačností – například i v oblasti střední Evropy. Další možnou výhodou je přizpůsobení emitovaného spektra spektrální odezvě PV článků (obrázek 2.1), nebo možnost skládání několika koncentrátorů s různými absorpčními a emisními spektry na sebe. Z estetických důvodů lze využít LSC i v budovách [1, 3]. V následujících částech této kapitoly bude podrobněji popsáno, jakým směrem se v minulosti ubíral vývoj této technologie a jaké varianty LSC v současné době existují.

## 2.1 Historický vývoj

Koncept LSC byl poprvé představen v první polovině 70. let minulého století a v následujících dvou dekadách byla vývoji koncentrátorů na bázi luminiscenčních emitorů věnovaná velká pozornost. Jednou z koncepcí bylo použití polymerové matrice s organickým barvivem. Dalším konceptem bylo sklo dopované anorganickými luminofory nebo vícevrstvý (multi-stack) LSC zkombinovaný s PV články na bázi různých polovodičů s odlišnými spektrálními odezvami (Si, GaAs, Ge). Po několika letech byl zveřejněn návrh LSC s použitím více barviv současně a bylo popsáno několik souvisejících problémů při tomto způsobu koncentrace záření. Tyto první typy LSC měly luminiscenční částice zakomponovány uvnitř hostitelské matrice (*bulk* LSC). Z důvodu poklesu cen PV článků a ropy ale zájem o tuto technologii v této době postupně klesl [3].



**Obrázek 2.2.** LSC s použitím různých fluorescenčních organických barviv. [8] (upraveno)

Po přibližně dvaceti letech se obnovil zájem o LSC díky potenciálu PV konverze mimo jiné v oblasti projektování budov [1]. V souvislosti s touto druhou generací LSC a díky novým technologiím a materiálům opět narostl počet článků o LSC a s novým přístupem byla vyvinuta technologie tenkovrstvých LSC (*thin-film* LSC). Princip tohoto nového konceptu spočívá v tom, že barvivo je deponováno na povrch zcela transparentní matrice. Toto provedení má potenciální výhodu v jednoduchosti své výroby a v omezení ztrát reabsorpcí. Nevýhodou je ale možné zhoršení světlovodných vlastností a zvýšení ztrát únikovým kuželem. Přesto bylo použitím tenké vrstvy z polymethylmethakrylátu (PMMA) a organického barviva dosaženo poměrně vysokých optických účinností. Výzkum se v dnešní době orientuje zejména na snížení ztrát a zvýšení optické účinnosti [3, 9].

## 2.2 Matrice LSC

Materiál matrice LSC by měl být transparentní s nízkou absorpcí a rozptylem světla. Dalším požadavkem je snadná depozice luminiscenčních látek do objemu matrice v případě *bulk* LSC [10]. Ve většině případů je matricí LSC pevná látka, a to konkrétně sklo, nebo polymer (nejčastěji PMMA). Skleněné matrice jsou oproti plastovým znevýhodněny, protože mají větší hmotnost, limitované možnosti dopování přímo do matrice a větší cenu oproti organickým matricím. Přesto se skleněné podklady stále využívají pro tenkovrstvé LSC [3]. Nevýhodou PMMA může být jeho hořlavost [11], což je v budovách nežádoucí.

Při spojování plastových nebo skleněných matic s PV články nastává ale problém. Když se fotony dostanou k okraji koncentrátoru, tak pouze 12,5 % opustí jeho objem.

Zbylá část je držena uvnitř totálními odrazy a určitý podíl z této části je spojen se ztrátami při transportu fotonu. Z tohoto důvodu není vhodné mít mezi koncentrátorem a PV článkem vzduchovou mezeru, ale je nutné použít materiál s větším indexem lomu než je matrice LSC, aby bylo možné sbírat maximální množství emitovaného světla [3].

Druhý typ matric pro LSC využívá flexibilních transparentních materiálů na bázi silikonů (*flexible* LSC). Třetí alternativou jsou kapalné LSC (*liquid* LSC), které umožňují snadnou modifikaci roztoku a výměnu po degradaci luminiscenčního materiálu. Při porovnání s *bulk* LSC dosahují podobných vlastností [3].

## 2.3 Fotoluminiscenční emitory

Jak již název LSC napovídá, jsou v tomto typu solárních koncentrátorů používány fotoluminiscenční (fluorescenční) částice, které absorbují světlo, a poté emitují fluorescenční záření o vyšší vlnové délce. Aby LSC dosahovaly dobrých vlastností, tak jsou od fotoluminiscenčních částic (luminoforů) vyžadovány následující charakteristiky [10]:

- Široké absorpční spektrum
- Absorpce slunečního záření
- Vysoká hodnota kvantového výtěžku
- Emisní spektrum vhodné pro PV články
- Stabilita pod slunečním zářením.

LSC zpočátku využívaly zejména dvou typů emitoreů – anorganické ionty (používané například v laserech) a organické luminofory. Anorganické částice mají výhodu vyšší stability a nižší reabsorpce. Jejich nevýhodou je často nevhodné emisní spektrum pro PV aplikace a nízký absorpční koeficient. Anorganickými emitory bývají ionty  $\text{Sm}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$ ,  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Tb}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ , nebo  $\text{UO}^{22+}$ , které se dopují do matrice [3, 10].

Častějším typem emitoreů jsou fotoluminiscenční organická barviva, která se třídí do několika skupin. Často používaná barviva jsou coumariny, rhodaminy a peryleny. Organické luminofory jsou oproti anorganickým výhodnější v kompatibilitě s různými polymerovými matricemi, do kterých je možné tyto částice dopovat. K vlastnostem organických barviv dále patří vysoký kvantový výtěžek, malý Stokesův posun (vede k větším ztrátám reabsorpce), slabé pokrytí solárního spektra (lze řešit použitím více barviv v jednom LSC) a nedostačující dlouhodobá stabilita pod slunečním zářením u některých barviv. Koncentrátory s těmito barvivy mohou vypadat například jako na obrázku 2.2. Velmi častým luminoforem pro LSC je perylenové barvivo Lumogen Red 305, které má vhodně posazené absorpční spektrum vzhledem k solárnímu spektru a vysokou hodnotu kvantového výtěžku [1, 3, 10].

Třetím častým a moderním typem jsou emitory na bázi core-shell nanočástic, z čehož i vychází název tohoto typu koncentrátorů – Quantum Dot Solar Concentrators (QDC). Technologie core-shell v tomto případě znamená, že luminiscenční barvivo (core) je zapouzdřeno obalem (shell) například na bázi oxidu křemíku, CdSe/CdS, nebo CdSe/ZnS [3, 12]. Výhodou QDC je možnost ladění absorpčního spektra a omezení ztrátových procesů volbou velikosti teček při růstovém procesu a lepší stabilita pod slunečním zářením. Mezi jejich nevýhody patří nízká hodnota kvantového výtěžku a velký překryv absorpčního a emisního spektra (vysoká reabsorpce). Oproti LSC na bázi organických barviv mají větší ztráty spojené s transportem světla uvnitř koncentrátoru [4]. Přesto se QDC jeví jako slibná technologie, u které je v současné době snaha snížit ztráty reabsorpce a zvýšit kvantový výtěžek [10].

# Kapitola 3

## Teoretická část

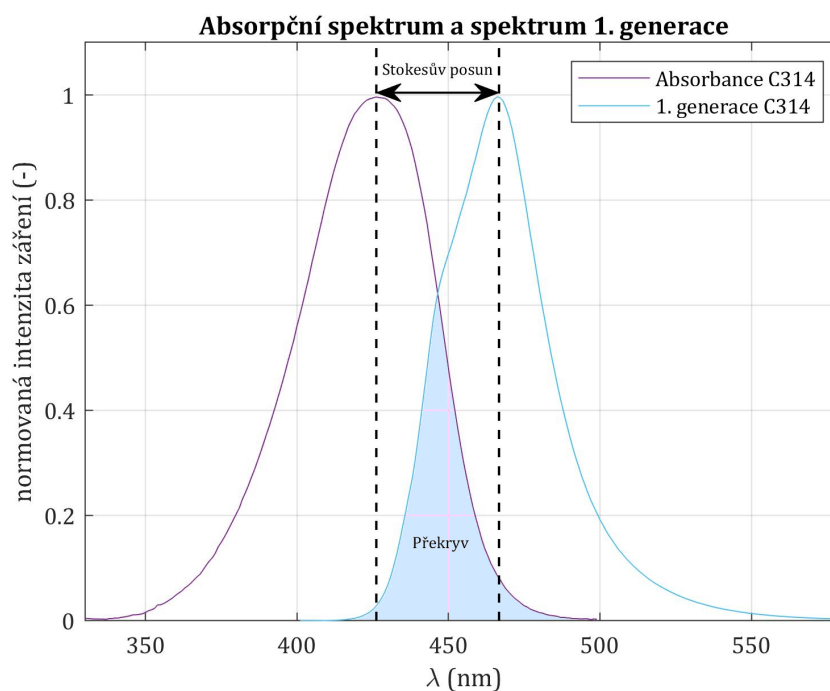
V této kapitole bude zaměřena pozornost na popis fyzikálních mechanismů a ztrát spojených s koncentrací světla pomocí LSC na bázi organických barviv. Dále budou uvedeny související veličiny a zákony, které budou použity při vyhodnocení cílů práce.

### 3.1 Fluorescence

LSC využívají jevu fluorescence. To je proces, při kterém dochází k excitaci molekul vlivem dopadajícího záření o vhodné vlnové délce ze základní elektronové hladiny na vyšší hladinu. Poté následuje proces vibrační relaxace, kdy se excitovaný elektron vrátí do nového základního stavu. Následně dochází k izotropnímu vyzáření fluorescenčního kvanta a k přechodu na původní základní elektronový stav [13]. Emisní spektrum je posunuto vzhledem k absorpčnímu spektru k větším vlnovým délkám a emitované fotony mají tedy nižší energii podle vztahu

$$E = \frac{hc_0}{\lambda}, \quad (1)$$

ve kterém  $E$  je energie fotonu (J),  $h$  je Planckova konstanta ( $6,626 \cdot 10^{-34}$  J s),  $c_0$  je rychlost světla ve vakuu ( $3 \cdot 10^8$  m s $^{-1}$ ) a  $\lambda$  je vlnová délka (m) [14]. Tento posun emisního spektra se nazývá Stokesův posun a je považován za jeden z důležitých ztrátových mechanismů spojených s LSC, který má za následek také ztráty reabsorpcí [15]. Určuje se jako rozdíl vlnové délky maxima emisního spektra a maxima absorpčního spektra.



**Obrázek 3.1.** Absorpční spektrum a spektrum 1. generace barviva Coumarin 314.

V LSC se jako luminofory používají fluorescenční barviva. Pro různé aplikace jsou vyžadovány odlišné vlnové délky světla, které LSC vyzařují, a proto se v praxi používá několik různých barviv. Při charakterizaci spekter luminoforů je často jejich emisní spektrum definováno jako spektrum 1. generace. Toto spektrum totiž nezahrnuje reabsorpci již absorbovaných fotonů. Absorpční spektrum a spektrum 1. generace jednoho takového barviva je na obrázku 3.1. Šipkou je vyznačen Stokesův posun a vybarvená oblast značí překryv, jehož velikost ovlivňuje pravděpodobnost reabsorpce. Absorpční spektrum a spektrum 1. generace jsou vůči sobě zrcadlově převrácená [15].

## 3.2 Optické vlastnosti LSC

### 3.2.1 Index lomu, Snellův zákon

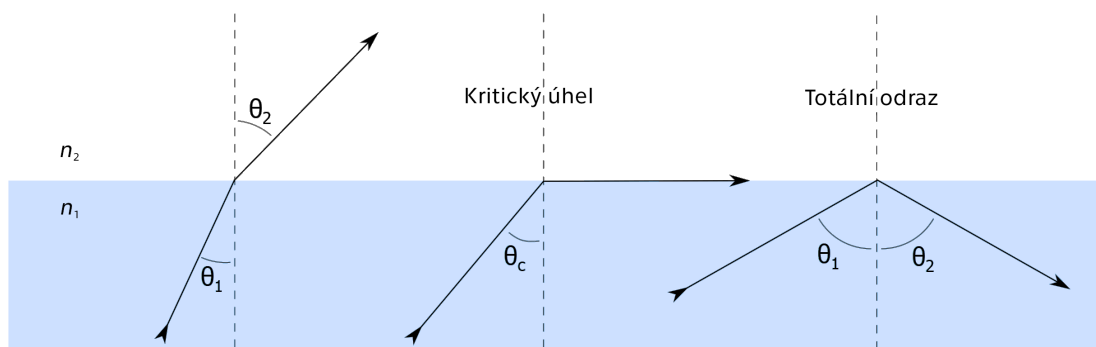
Jednou ze základních veličin v optice je index lomu  $n$  (-). Tato veličina popisuje optickou vlastnost transparentního prostředí, kterým se šíří světlo. Index lomu je definován vztahem

$$n = \frac{c_0}{v}, \quad (2)$$

kde  $v$  je rychlost šíření světla v dané látce ( $\text{ms}^{-1}$ ) [16]. Na rozhraní dvou prostředí s jinými indexy lomu dochází k lomu světla. Tento děj popisuje Snellův zákon lomu

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2, \quad (3)$$

ve kterém  $n_1$  je index lomu prostředí, ze kterého světlo přichází (-),  $n_2$  je index lomu prostředí, do kterého světlo vstupuje (-),  $\theta_1$  je úhel dopadu ( $^\circ$ ) a  $\theta_2$  je úhel, pod kterým se světlo láme ( $^\circ$ ) [16–17].



**Obrázek 3.2.** Lom světla na rozhraní dvou prostředí. [17] (upraveno)

Pro konkrétní případ LSC, jehož matrice by byla ze skla, jako tomu bude i v praktické části této práce, je možné vypočítat kritický úhel pomocí známých indexů lomu vzduchu a skla. Sklo má index lomu  $n_1 = 1,5$  a vzduch má index lomu  $n_2 = 1$  (PMMA má index lomu 1,49) [18]. Pro úhel dopadu větší než kritický dojde k totálnímu odrazu, takže světelné kvantum zůstane v objemu koncentrátoru, což je příznivé. Naopak pro úhel menší než kritický dochází k úniku světla ven z koncentrátoru a dochází k tzv. ztrátám únikovým kuželem. Tyto situace jsou znázorněny na obrázku 3.2. Pro kritický úhel platí vztah:

$$\theta_C = \arcsin \left( \frac{n_2}{n_1} \sin \theta_2 \right) = \arcsin \left( \frac{1}{1,5} \sin 90^\circ \right) \doteq 41^\circ 48'. \quad (4)$$

### 3.2.2 Geometrický výtěžek, koncentrační faktor

LSC koncentrují sluneční záření dopadající na velkou plochu koncentrátoru do menší plochy okrajových stěn koncentrátoru. Tento geometrický výtěžek  $G$  (-) je dán vztahem

$$G = \frac{A_{\text{in}}}{A_{\text{out}}}, \quad (5)$$

ve kterém  $A_{\text{in}}$  plocha vrchní stěny LSC ( $\text{mm}^2$ ) a  $A_{\text{out}}$  je plocha okrajových stěn, na kterých jsou připevněny PV články ( $\text{mm}^2$ ) [3].

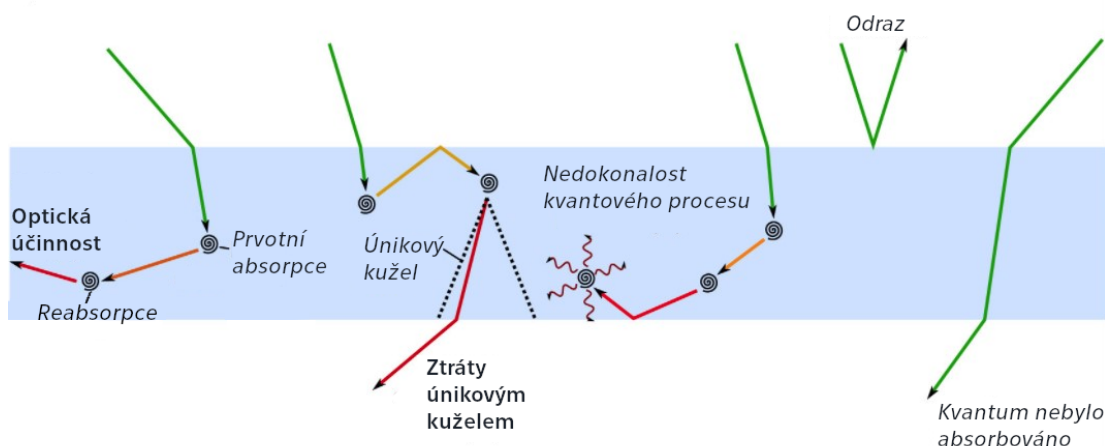
Geometrický výtěžek reprezentuje teoretický limit koncentračního faktoru  $C$  (-), který může být definován například jako

$$C = \frac{I_{\text{out}}}{I_{\text{in}}}, \quad (6)$$

kde  $I_{\text{out}}$  je intenzita koncentrovaného záření ( $\text{W m}^{-2}$ ) a  $I_{\text{in}}$  je intenzita dopadajícího záření ( $\text{W m}^{-2}$ ). Velikost koncentračního faktoru je limitována několika ztrátovými procesy [3].

### 3.3 Ztrátové procesy spojené s LSC

Proces koncentrace záření doprovází několik ztrátových dějů. Část dopadajícího záření se odráží, část projde materiálem a část se absorbuje částicemi fluorescenčního barviva. Kvantum, které je absorbováno luminofory, může být znovu emitováno s menší energií. Toto emitované kvantum může opustit koncentrátor únikovým kuželem, nebo se může odrazet uvnitř koncentrátoru směrem k jeho okraji. Případně, pokud fluorescenční světlo má dostatečnou energii, může být znovu absorbováno – tento děj se nazývá reabsorpce fluorescenčního světla [8]. V této práci bude zaměřena pozornost na vhodnou aproximaci pravděpodobnosti reabsorpce, aby bylo možné určit optickou účinnost koncentrátorů. Ostatní typy ztrát lze buď snadno spočítat, nebo jejich vliv je malý a bude zanedbán. Ztrátové procesy jsou znázorněny na obrázku 3.3.



Obrázek 3.3. Ztrátové procesy spojené s LSC. [8] (upraveno)

### 3.4 Spektroskopická měření

Pro popis a měření absorpce a emise fluorescenčních barviv v LSC se využívají spektroskopické metody, jejichž výstupem jsou absorpční a emisní spektra dané látky jakožto závislosti intenzity záření na vlnové délce, která popisuje interakci elektromagnetického záření se vzorkem. Pro další výpočty se používají veličiny, které z praktických důvodů nevyjadřují absolutní hodnoty, ale relativní. Nejdříve je nutné zavést vstupující zářivý tok  $\phi_0$  (W), ke kterému se právě některé veličiny vztahují. Mezi další proměnné patří vystupující zářivý tok  $\phi$  (W), absorbovaný zářivý tok  $\phi_a$  (W) a odražený zářivý tok  $\phi_r$  (W). Použitím zmíněných zářivých toků vyjadřujeme veličiny transmitance  $\tau$  (-), absorptance  $a$  (-), reflektance  $\varrho$  (-) a absorpance  $A$  (-). Platí vztahy [15, 19]:

$$\tau = \frac{\phi}{\phi_0}, \quad (7)$$

$$a = \frac{\phi_a}{\phi_0}, \quad (8)$$

$$A = -\log \frac{\phi}{\phi_0} = \log \frac{\phi_0}{\phi} = -\log \tau, \quad (9)$$

$$\varrho = \frac{\phi_r}{\phi_0}, \quad (10)$$

$$\tau + a + \varrho = 1. \quad (11)$$

Transmitance vyjadřuje část vstupující zářivého toku, která prošla vzorkem, absorptance udává, jak velká část vstupujícího zářivého toku byla absorbována barvivem, absorpance je logaritmické vyjádření části záření, které bylo vzorkem pohlceno, a reflektance je část vstupujícího zářivého toku, která se odrazila od vzorku. Vstupující zářivý tok se dělí na odražený, absorbovaný a vystupující.

V praktické části této práce budou prováděna spektroskopická měření, jejichž výstupem jsou data z fotoelektrického detektoru, který měřené vlnové délce přiřadí určitou hodnotu zářivého toku. Rozlišujeme zářivý tok  $\phi$  (W) a spektrální zářivý tok  $\phi_\lambda$  (W m<sup>-1</sup>). Zářivý tok je energie o všech přípustných vlnových délkách procházející danou plochou za jednotku času. Spektrální zářivý tok je energie o jedné konkrétní vlnové délce procházející danou plochou za jednotku času [20]. Pro interpretaci výsledků nebude většinou podstatná konkrétní změřená absolutní hodnota, ale bude stačit změřené spektrum vhodně normalizovat. To bude provedeno tak, že v každém bodě spektra dojde k vydělení maximálním spektrálním zářivým tokem daného spektra, čímž dostaneme výsledný normovaný zářivý tok. Hodnoty na závislé ose budou tedy v intervalu od nuly do jedné. Tento princip normování je využíván ve fotometrii a radiometrii [21]. K vyjádření hodnot lze alternativně použít také intenzita záření  $I_e$  (W m<sup>-2</sup>), která je rovna plošné hustotě zářivého toku [20]. Stejným způsobem můžeme spočítat normovanou intenzitu záření, která je rovna podílu spektrální intenzity záření a maximální spektrální intenzity záření v daném spektru.



### 3.5 Lambert-Beerův zákon

Důležitým vztahem pro vyhodnocování absorpčních vlastností LSC je Lambert-Beerův zákon, který udává vztah mezi absorpencí  $A$  (–), látkovou koncentrací absorbujícího barviva  $c$  (M), optickou dráhou světla  $l$  (cm) a molárním absorpčním koeficientem dané látky  $\varepsilon$  ( $\text{M}^{-1}\text{cm}^{-1}$ ). Zákon je dle [19] popsán vztahem

$$\phi = \phi_0 10^{-\varepsilon c l}. \quad (12)$$

Koeficient  $\varepsilon$  udává absorpční vlastnost daného barviva a někdy se člen  $\varepsilon c$  udává jako absorpční koeficient  $\alpha$  ( $\text{cm}^{-1}$ ), který v sobě zahrnuje i koncentraci barviva. Lambert-Beerův zákon platí pouze pro monochromatické světlo a pro zředěné roztoky, ve kterých absorpční částice nepodléhají žádným vzájemným interakcím. V praxi často neznáme velikost optické dráhy  $l$  ani hodnotu koeficientu  $\varepsilon$  [19]. Vzorec lze dále upravit s použitím vztahu (9) na

$$A = \varepsilon c l = \alpha l. \quad (13)$$

### 3.6 Optická účinnost

Jedním z cílů této práce je vyhodnocení pravděpodobnosti reabsorpce a zvolení vhodné teorie pro aproximaci a vyhodnocení optické účinnosti LSC. Zdrojem pro tuto teorii bude zejména [3] a [22].

Kromě optické účinnosti se v aplikacích, kdy jsou na LSC připojeny již PV články, používá pro popis takového systému také kvantová účinnost. Ta je definována jako poměr počtu produkovaných elektronů PV článkem k počtu dopadajících fotonů dané vlnové délky. Kvantovou účinnost lze dále rozdělit na externí a interní – externí kvantová účinnost  $EQE$  (–) zahrnuje všechny dopadající fotony a interní kvantová účinnost  $IQE$  (–) zahrnuje pouze ty dopadající fotony, které nebyly odražené [23]. Protože v této práci ale nebudou v praktické části ke vzorkům LSC připojovány PV články, nebude popis pomocí kvantové účinnosti použit. V následujících částech textu budou popsány veličiny, pomocí kterých bude určena optická účinnost samotných LSC.

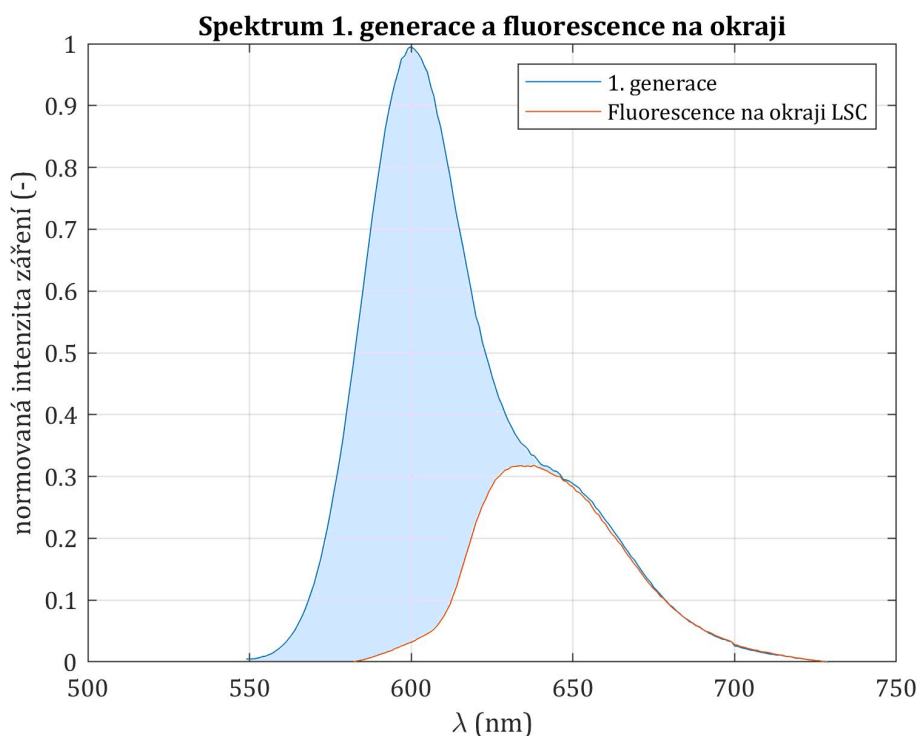
#### 3.6.1 Pravděpodobnost reabsorpce

Vlivem překryvu absorpčního a emisního spektra fluorescenčního barviva dochází k opětovné absorpci (reabsorpci). Při tomto ději se výsledné emisní spektrum posouvá k větším vlnovým délkám a emitované fotony mají nižší energii. Reabsorpci lze popsat funkcí  $r(\lambda)$ , která udává pravděpodobnost, že foton o vlnové délce  $\lambda$ , který byl emitovaný vně únikového kuželu, je reabsorbován [22]. Další komponentou pro určení reabsorpce je fluorescenční spektrum barviva, které nezahrnuje reabsorpci. Toto spektrum se proto nazývá spektrum 1. generace a pro účel výpočtu pravděpodobnosti reabsorpce bude specifikováno funkcí  $f_1(\lambda)$ . Spektrum 1. generace bude normováno tak, aby platilo  $\int f_1(\lambda) d\lambda = 1$ , a celková pravděpodobnost reabsorpce přes všechny vlnové délky se poté určí dle [22] jako

$$R = \int r(\lambda) f_1(\lambda) d\lambda. \quad (14)$$

Z naměřených dat se výpočet reabsorpce zkonstruuje pomocí spektra 1. generace a spektra okrajové fluorescence měřeného vzorku, které je na spektrum 1. generace normováno. Toto normování se provede tak, že intenzita spektra okrajové fluorescence se v každém bodě vynásobí konstantou úměrnosti takovou, aby platilo, že plocha pod

spektrům okrajové fluorescence (v oblasti větších vlnových délek, kde již neprobíhá reabsorpce) se bude rovnat ploše pod spektrem 1. generace (ve stejném rozsahu vlnových délek). Vyplněná část v grafu na obrázku 3.4 je část, která se reabsorbovala [22].



**Obrázek 3.4.** Grafické znázornění výpočtu reabsorpce. Spektrum okrajové fluorescence je normováno tak, aby splývalo se spektrem 1. generace. Vyplněná oblast odpovídá pravděpodobnosti reabsorpce.

Pravděpodobnost reabsorpce  $R$  (-) se spočítá dle vztahu

$$R = \frac{S_1 - S_o}{S_1}, \quad (15)$$

kde  $S_1$  představuje plochu pod grafem 1. generace fluorescence a  $S_o$  představuje plochu pod grafem okrajové fluorescence. Pravděpodobnost reabsorpce se může rozlišit na reabsorpci v únikovém kuželu  $\bar{R}$  a reabsorpci vně únikového kuželu  $R$  [22]. Protože v této práci budeme analyzovat tenkovrstvé LSC, u kterých se luminofory nacházejí jen v tenké vrstvě na povrchu matrice a ne v jejím objemu, tak budeme hodnotu  $\bar{R}$ , která by nešla přesně určit, považovat za nulovou.

### 3.6.2 Další ztráty

Další částí ztrát, kterou je nutné brát v úvahu, jsou ztráty únikovým kuželem, které závisí na indexu lomu matrice  $n_1$ . Pravděpodobnost ztrát z únikového kuželu  $P$  (-) se spočítá dle [3] vztahem

$$P = 1 - \sqrt{\frac{n_1^2 - 1}{n_1^2}}. \quad (16)$$

Ztráty, které mají oproti ostatním ztrátám méně významnou roli, jsou ztráty odrazem. Tyto ztráty jsou pro sklo nebo PMMA přibližně 4 % a pro následující výpočty budou zanedbány [3].

### ■ 3.6.3 Účinnost kolekce

Účinností kolekce rozumíme poměr počtu emitovaných fotonů z hrany koncentrátoru k počtu fotonů absorbovaných v koncentrátoru. Absorpční a emisní spektra fluorescenčních barviv se často vzájemně překrývají, a dochází tudíž k reabsorpci již absorbovaných fotonů. Celková účinnost kolekce je poté sumou účinnosti kolekce každé generace fotonů. Dle [22] lze tuto sumu zjednodušit. Vztah pro celkovou účinnost kolekce je potom:

$$Q_C = \frac{N_{\text{Work}}}{N_{\text{Abs}}} = \frac{\phi_f(1-P)(1-R)}{1 - \phi_f[(1-P)R - PR]} \approx \frac{\phi_f(1-P)(1-R)}{1 - \phi_f(1-P)R}, \quad (17)$$

kde  $Q_C$  je účinnost kolekce (-),  $N_{\text{Work}}$  je počet užitečných vstupujících fotonů (-),  $N_{\text{Abs}}$  je počet absorbovaných fotonů (-) a  $\phi_f$  je kvantový výtěžek (-), který se rovná podílu počtu emitovaných fotonů a počtu absorbovaných fotonů. U luminiscenčních barviv může kvantový výtěžek dosahovat hodnot větších než 0,9 [13, 22].

### ■ 3.6.4 Účinnost absorpce

Účinnost absorpce udává poměr počtu absorbovaných fotonů koncentrátorem k počtu vstupujících fotonů a lze ho spočítat dle [22] jako

$$Q_A = \frac{N_{\text{Abs}}}{N_0}, \quad (18)$$

ve kterém  $Q_A$  je účinnost absorpce (-),  $N_{\text{Abs}}$  je počet absorbovaných fotonů (-) a  $N_0$  je celkový počet vstupujících fotonů (-).

Při uvažování toho, že vstupující zářivý tok  $\phi_0$  se dělí pouze na absorbovaný zářivý tok  $\phi_a$  a vystupující zářivý tok  $\phi$  (zanedbáme odraženou část), tak můžeme několika úpravami s použitím vztahů (12), (13) a (18) získat další vztah pro účinnost absorpce:

$$\phi = \phi_0 10^{-\varepsilon c l} = \phi_0 10^{-A}, \quad (19)$$

$$\phi_0 - \phi_a = \phi_0 10^{-A}, \quad (20)$$

$$Q_A = \frac{\phi_a}{\phi_0} = \frac{\phi_0 - \phi}{\phi_0} = 1 - 10^{-A} = 1 - 10^{-\varepsilon c l}. \quad (21)$$

### ■ 3.6.5 Výpočet optické účinnosti

Optická účinnost udává poměr počtu emitovaných fotonů z hrany LSC k počtu vstupujících fotonů. Po znalosti předchozích vztahů a veličin lze spočítat celkovou optickou účinnost  $\eta$  (-) dle [22] použitím vzorce

$$\eta = Q_A Q_C = \frac{N_{\text{Work}}}{N_0}. \quad (22)$$

Pokud tedy určíme pomocí měření pravděpodobnost reabsorpce a účinnost absorpce každého LSC, bude snadné dopočítat celkovou optickou účinnost jednotlivých koncentrátorů.

# Kapitola 4

## Praktická část

V praktické části této práce budou popsány kroky, které vedly k přípravě vzorků LSC. Po přípravě vzorků následují potřebná měření, jejichž výstupy budou použity k vyhodnocení reabsorpce a optické účinnosti připravených vzorků.

### 4.1 Použité přístroje

Během přípravy a měření vzorků bylo použito několik přístrojů, které jsou vypsány v tabulce 4.1. V dalších částech textu bude pokaždé zmíněno, v jakých fázích praktické části došlo k jejich použití.

Název přístroje	Popis přístroje
Bentham Detection Electronics	Zesílení a převod signálu
Bentham TMc300	Monochromátor
Hamamatsu R446	Fotonásobič
Laurell WS-650	Rotační nanášec (spincoater)
Ohaus Pioneer	Analytické váhy
PicoQuant LDH-P-C-440B	Laser (443 nm)
PicoQuant PDL 800-D	Laser driver
Thorlabs OSL2	Zdroj kolimovaného bílého světla
Ultrasonic Laboratory 6	Ultrazvuková čistička

**Tabulka 4.1.** Použité přístroje.

### 4.2 Příprava vzorků

Vzorky LSC budou připravovány způsobem, který bude u všech vzorků totožný a nebude závislý na zvoleném barvivu. Nejprve bude vyroben roztok, a poté se roztok s PMMA nanese ve formě tenké vrstvy na svrchní stěnu matrice – laboratorního sklíčka. Všechna sklíčka mají rozměry 20 mm × 20 mm × 2 mm.

#### 4.2.1 Příprava roztoku

Z fluorescenčních barviv ve formě prášku potřebujeme získat roztok, který bude rovnoměrně nanesen na sklíčka. Postup přípravy se skládá z následujících kroků:

1. Volba objemu roztoku a jeho koncentrace.
2. Výpočet hmotnosti barviva pro zvolený objem a koncentraci.
3. Přidání barviva do zvoleného objemu toluenu.
4. Výpočet hmotnosti PMMA ve správném poměru s roztokem.
5. Přidání PMMA do roztoku.

PMMA se do roztoku přidává z praktických důvodů. Molární koncentrace barviva  $c$  je zvolena ve vhodném rozsahu. V našem případě je to rozsah od  $c = 10^{-1}$  M do  $c = 10^{-5}$  M ( $1 \text{ M} = 1 \text{ mol/l}$ ). V tomto rozsahu vyrobíme přibližně pět vzorků s odlišnými koncentracemi barviva. Před samotným výpočtem je nutné určit objem roztoku  $V$  – obvykle bude stačit  $V = 0,5$  ml. Potřebnou hmotnost barviva  $m$  vypočteme ze vztahu

$$m = cMV, \quad (1)$$

ve kterém  $M$  je molární hmotnost daného barviva (g/mol) [24]. Hustota toluenu je  $\rho_T = 867$  g/l [25] a potřebnou hmotnost toluenu  $m_T$  získáme ze vztahu

$$m_T = \rho_T V. \quad (2)$$

Hmotnost PMMA  $m_P$  zvolíme v poměru 1:6 vzhledem k roztoku toluenu s barvivem. Tento poměr vychází ze zkušeností s nanášením tenkých vrstev PMMA v toluenu a bere v úvahu také mírné odpařování toluenu z tohoto roztoku v čase. Stejný poměr byl použit v práci [26]. Protože hmotnost barviva je oproti hmotnosti toluenu malá, tak se  $m_P$  určí jako

$$m_P = \frac{m + m_T}{6} \approx \frac{m_T}{6}. \quad (3)$$

Tabulka 4.2 obsahuje vypočtené hodnoty pro přípravu roztoků a seznam použitých barviv včetně jejich koncentrace. Příprava bude prováděna tak, že nejprve se připraví dostatečné množství roztoku o zvolené nejvyšší koncentraci a roztoky s nižší koncentrací se budou vyrábět zředěním tohoto koncentrovanějšího roztoku (z důvodu přesnosti). Po přípravě těchto roztoků se podle jejich objemu přidá dle vztahu (3) odměřená hmotnost PMMA. Pro snadnější rozpuštění PMMA je použita ultrazvuková čistička.

Barvivo	$V$ (ml)	$M$ ( $\frac{\text{g}}{\text{mol}}$ )	$c$ (M)	$m$ (mg)	$m_T$ (mg)	$m_P$ (mg)
Coumarin C314	0,5	313,4	$10^{-1}$	15,7	433,5	72,1
			$10^{-2}$	1,6		
			$3 \cdot 10^{-3}$	0,5		
			$10^{-3}$	0,16		
Lumogen Orange 240	0,5	710,9	$10^{-2}$	3,6	433,5	72,1
			$10^{-3}$	0,36		
			$10^{-4}$	0,04		
			$10^{-4}$	0,02		
Lumogen Red 305	0,5	963,9	$10^{-2}$	4,8	433,5	72,1
			$2 \cdot 10^{-3}$	0,98		
			$10^{-3}$	0,48		
			$2 \cdot 10^{-4}$	0,10		
			$10^{-4}$	0,05		

**Tabulka 4.2.** Vypočtené hodnoty pro přípravu roztoků.

### 4.2.2 Nanášení roztoku

Fluorescenční vrstva se na sklíčko nanáší metodou spin coating (rotační nanášení). Sklíčko se nejprve pomocí vakuové vývěvy přichytí uvnitř přístroje. Poté je pipetou nanesen připravený roztok (přibližně 200  $\mu\text{l}$  stačí) a zavře se poklop přístroje. Po nastavení rotačního cyklu dochází k rotaci sklíčka. Při vhodném nastavení je dosaženo rovnoměrné, tenké a hladké vrstvy [26–27]. Pro všechny vzorky bylo nastavení stejné:

1. 500 ot/min, 5 sekund
2. 500 ot/min, 1,5 sekund
3. 2000 ot/min, 1,5 sekund
4. 4000 ot/min, 90 sekund.



**Obrázek 4.1.** Připravené vzorky LSC (odshora barviva: Lumogen Red 305, Coumarin 314, Lumogen Orange 240). V obrázku je doplněn ke každému vzorku popis s koncentrací barviva v tenké vrstvě.

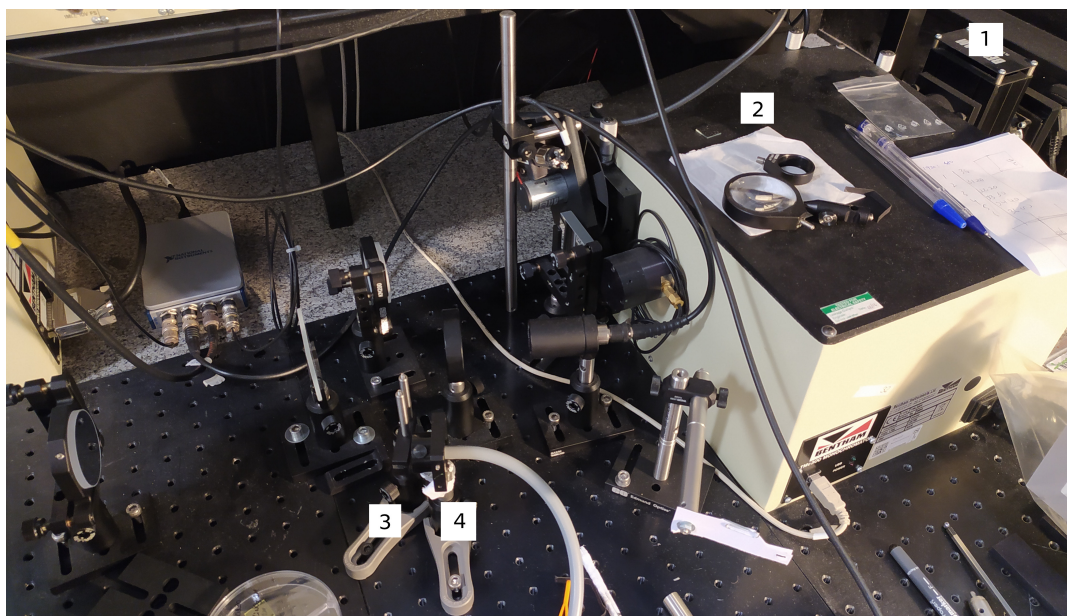
Na obrázku 4.1 jsou všechny připravené vzorky LSC. Lze vidět, že luminiscenční vrstva je rovnoměrná a na první pohled lze pozorovat, že z hran vzorků vystupuje koncentrované luminiscenční světlo. Vzorek s barvivem Coumarin 314 s koncentrací  $10^{-1}\text{ M}$  nebyl v praktické části použit z důvodu vysoké reabsorpce a širokého emisního spektra s nízkou intenzitou.

## 4.3 Měření

V této části budou vysvětleny postupy měření pro charakterizaci připravených vzorků a budou znázorněna důležitá změřená data. Naměřené hodnoty jsou s použitím vztahů z teoretické části vhodně zobrazeny. Tato data budou sloužit pro výsledné vyhodnocení.

### 4.3.1 Měření absorpčních vlastností barviv a vzorků

Pro měření absorpčních spekter je použit spektrofotometrický systém. Ten je tvořen zdrojem světla s monochromátorem, optickými prvky k vedení a zaostření světla a detekční částí, která pozůstává z optického vlákna pro sběr signálu, dalšího monochromátoru a detektoru. Zdrojem světla je halogenová lampa, za kterou je umístěn monochromátor, který z tohoto světla vybírá pomocí natáčecích mřížek téměř monochromatické světlo – konkrétně se jedná o Czerny-Turner konfiguraci monochromátoru. Monochromatické světlo poté prochází vzorkem a prošlá část tohoto světla je optickým vláknem přivedena k druhému monochromátoru, který je současně s prvním monochromátorem nastaven na propustnost daného monochromatického světla. Toto světlo je přivedeno na fotonásobič [28].



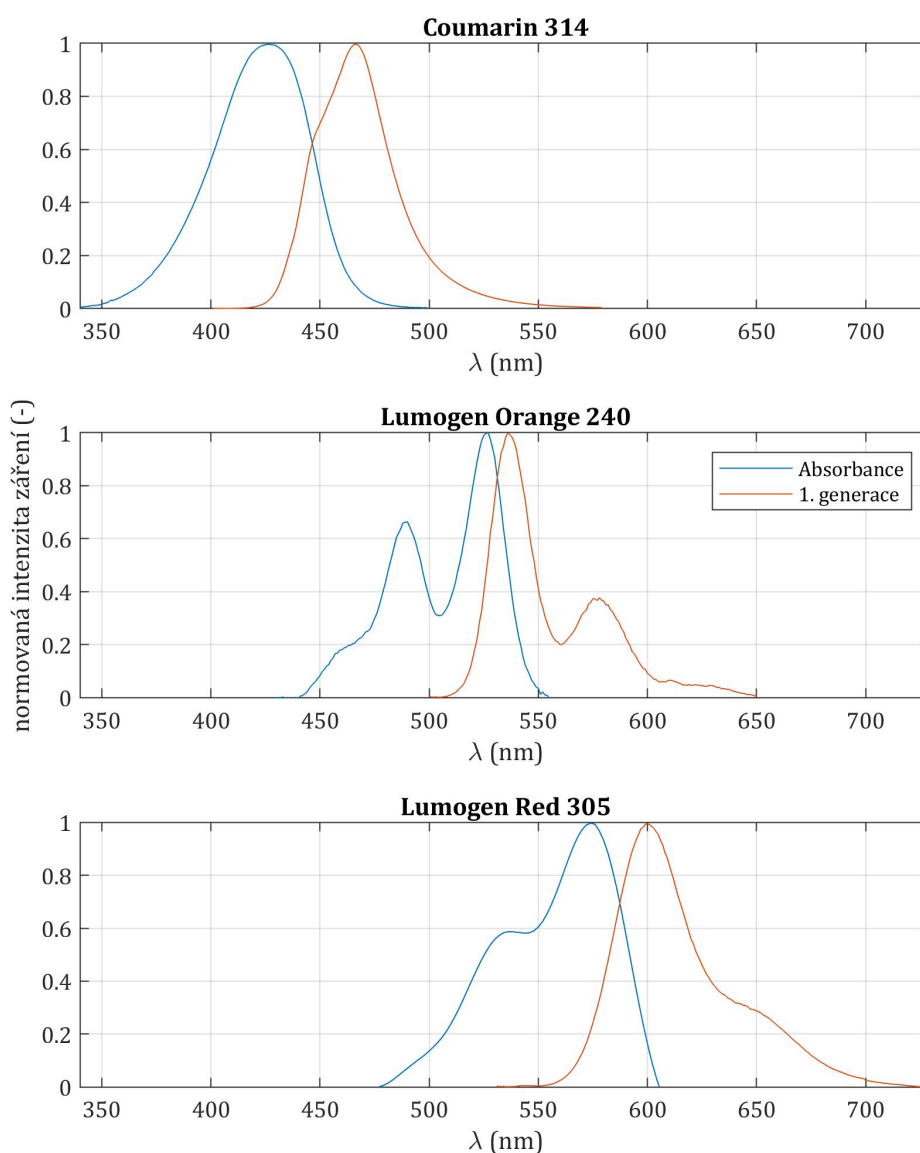
**Obrázek 4.2.** Uspořádání měření absorpčních spekter (1 – zdroj světla, 2 – monochromátor, 3 – uchycení měřeného vzorku, 4 – detektor).

Vzorkem je v tomto případě buď roztok s barvivem v kyvetě, nebo již připravené vzorky LSC. Dále je nutné provést obdobné měření, při kterém je vlákno s detektorem umístěno tak, aby na něj přímo dopadalo světlo z monochromátoru, čímž získáme referenční spektrum. Absorbance se spočítá podle vztahu (9) v kapitole 3.4, přičemž  $\phi_0$  bude respektovat referenční spektrum a  $\phi$  spektrum kyvety s roztokem (resp. připraveného vzorku).

Měření proběhlo v rozsahu vlnových délek 300–850 nm. Výsledky jednoho takového měření jsou znázorněny na obrázku B.1, na kterém je vidět, že s vyšší koncentrací barviva je vyšší také absorbance. S použitím vztahu (21) v kapitole 3.6 se následně spočítá účinnost kolekce  $Q_A$ .

### 4.3.2 Měření spekter 1. generace použitých barviv

Dalším charakteristickým spektrem jednotlivých barviv je jejich spektrum 1. generace. Aby byl omezen vliv reabsorpce, je nutné provést měření na roztoku v kyvetě, který má velmi nízkou koncentraci barviva ( $c < 10^{-5}$  M). Skrz tuto kyvetu bude svítit paprsek laseru o vlnové délce 443 nm a detektor se umístí do blízkosti kyvetu tak, aby nebyl osvětlován paprskem laseru, ale zároveň zachytil světlo emitované fluorescenčním barvivem. Měření proběhlo v rozsahu vlnových délek 300–850 nm a nebyly prováděny další výpočty kromě normování. Absorpční spektra a spektra 1. generace použitých barviv jsou na obrázku 4.3. Můžeme pozorovat, že barviva se liší v posazení svých spekter a ve velikosti Stokesova posunu, který určuje překryv absorpčních a emisních pásů, a tedy i pravděpodobnost reabsorpce. Velikosti Stokesových posunů pro jednotlivá barviva jsou v tabulce 4.3.

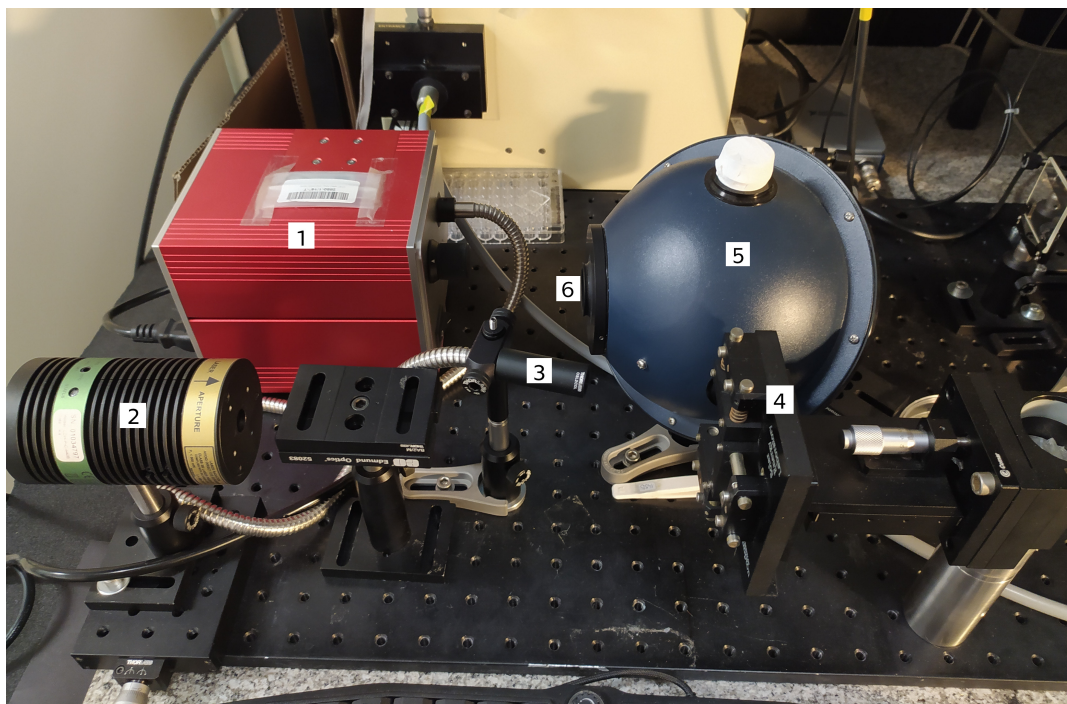


**Obrázek 4.3.** Absorpční spektra (modře) a spektra 1. generace (oranžově) použitých fluorescenčních barviv (odshora barviva: Coumarin 314, Lumogen Orange 240, Lumogen Red 305). Svislá osa – normovaná intenzita záření (-), vodorovná osa – vlnová délka (nm).



### 4.3.3 Měření fluorescenčních spekter při celoplošném osvětlování vzorků

Dalším krokem, který povede na vyhodnocení reabsorpce, je měření fluorescenčních spekter vzorků. V tomto případě byly koncentrátoři osvětlovány širokospektrálním stabilním bílým světlem, jehož zdrojem byla halogenová lampa. Světlo bylo vedeno z přístroje optickým vláknem, na jehož konci byl kolimátor. Výběr tohoto světelného zdroje souvisí s tím, že v praktickém použití je koncentrátor osvětlován širokospektrálním slunečním světlem a po celé jeho ploše.



**Obrázek 4.4.** Uspořádání měření emisních spekter vzorků (1 – zdroj bílého světla, 2 – laser, 3 – kolimátor bílého světla, 4 – uchycení vzorku, 5 – kulový integrátor, 6 – místo pro umístění detektoru).

Uspořádání těchto měření je takové, že vzorek se umístí před kulový integrátor tak, aby z jedné jeho menší stěny (tzv. *aktivní hrana*) vystupovalo emitované světlo do integrátoru. Ostatní tři menší stěny vzorku jsou zakryté černým papírem, aby nedošlo k ovlivnění výsledku. Kolmo na koncentrátor svítí zdroj světla tak, aby paprsky dopadaly po celé ploše svrchní strany koncentrátoru. Kulový integrátor je použit proto, aby bylo zachyceno veškeré fluorescenční světlo z aktivní hrany koncentrátoru. V integrátoru je v každém jeho bodě stejná intenzita záření a v jednom jeho výstupu je umístěn detektor světla.

Měření vždy proběhlo v rozsahu vlnových délek 300–850 nm. Změřená spektra byla korigována odečtením spektra čistého sklíčka, a poté byla normována na spektra 1. generace. Výsledky jsou na obrázku B.2. Z tohoto grafu vidíme, že po normování je plocha mezi spektrem okrajové fluorescence a spektrem 1. generace nejmenší pro vzorky s nízkou koncentrací, a naopak největší pro vzorky s vyšší koncentrací. To odpovídá předpokladu, že pravděpodobnost reabsorpce roste s rostoucí koncentrací barviva.

V tabulce 4.3 jsou číselné výsledky výpočtu pravděpodobnosti reabsorpce jednotlivých vzorků LSC. Lze pozorovat, že vzorky s barvivem Coumarin 314 mají celkově vyšší pravděpodobnosti reabsorpce než vzorky ostatních dvou barviv při stejné koncentraci. Nejnižší hodnoty mají vzorky s barvivem Lumogen Red 305.

Při výpočtu pravděpodobnosti reabsorpce mělo velký vliv na výsledek vhodné odečtení pozadí (jako vzorek pro měření pozadí bylo použito čisté sklíčko). Normování spektra okrajové fluorescence na spektrum 1. generace proto nemusí být zcela dokonalé. U vzorků s vysokou koncentrací barviva nastával problém s výstupním signálem, který byl roztažený do širšího intervalu vlnových délek (vlivem reabsorpce). U vzorků s nižší koncentrací byl problém se slabším výstupním signálem v celém spektru, což mělo za následek snížení poměru signálu vůči pozadí. Z tohoto důvodu bylo provedeno několik blízkých akceptovatelných výsledků tohoto normování, ze kterých byl vyvozen odhad absolutní chyby při zpracování dat z měření. Tyto hodnoty jsou dány do pravého sloupce tabulky 4.3.

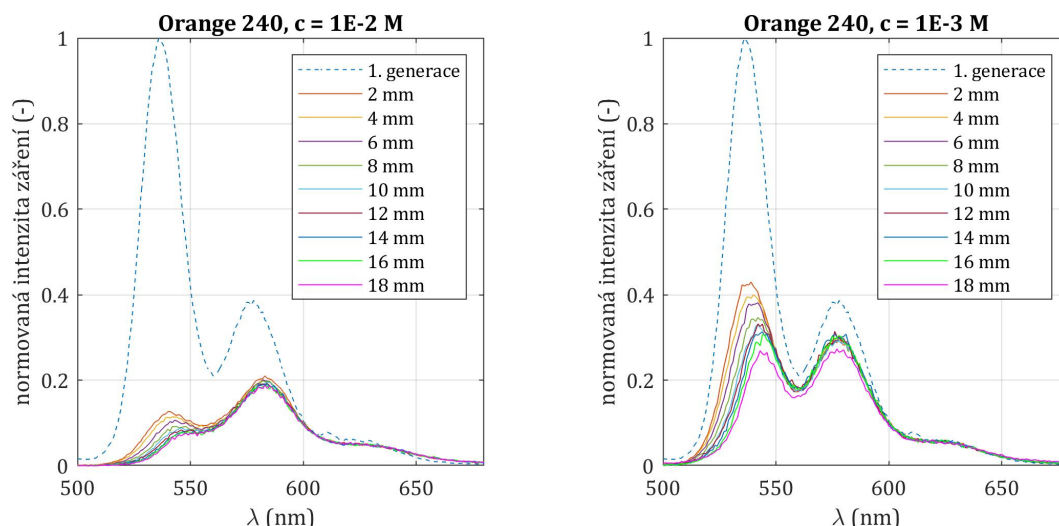
Barvivo	Stokesův posun (nm)	$c$ (M)	$R$ (%)	$\Delta$ (%)
Coumarin C314	41,0	$10^{-2}$	78,7	$\pm 1,3$
		$3 \cdot 10^{-3}$	59,7	$\pm 5,3$
		$10^{-3}$	51,0	$\pm 5,6$
		$10^{-4}$	27,1	$\pm 0,2$
Lumogen Orange 240	10,5	$10^{-2}$	74,1	$\pm 3,5$
		$10^{-3}$	50,3	$\pm 5,8$
		$10^{-4}$	36,1	$\pm 5,4$
Lumogen Red 305	25,0	$10^{-2}$	68,1	$\pm 2,9$
		$2 \cdot 10^{-3}$	52,4	$\pm 2,0$
		$10^{-3}$	47,9	$\pm 4,5$
		$2 \cdot 10^{-4}$	24,3	$\pm 8,0$
		$10^{-4}$	19,1	$\pm 7,5$

**Tabulka 4.3.** Změřené hodnoty Stokesova posunu pro použitá barviva a vypočtené hodnoty pravděpodobnosti reabsorpce jednotlivých vzorků při osvětlování bílým světlem společně s odhadovanou absolutní chybou.

#### 4.3.4 Měření fluorescenčních spekter při bodovém osvětlování vzorků

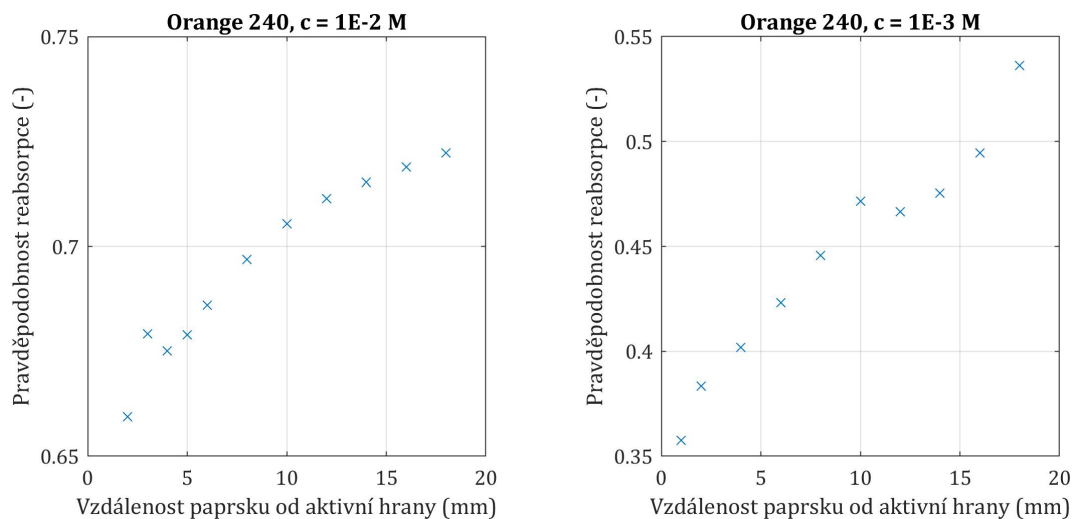
Druhým způsobem měření fluorescenčních spekter vzorků je osvětlování jejich svrchní plochy bodovým laserem. Uspořádání tohoto měření je stejné jako při osvětlování bílým světlem, ale zdrojem světla je v tomto případě laser, který je i na obrázku 4.4. Měření probíhá tak, že pro jeden vzorek je provedeno několik měření s různou polohou dopadajícího paprsku. Směrem od aktivní hrany koncentrátoru, která je umístěna před otvor integrátoru, bude s krokem 2 mm postupně posunováno laserem. Pro každý bod se určí pravděpodobnost reabsorpce a z těchto hodnot se spočítá průměrná hodnota pravděpodobnosti reabsorpce pro konkrétní vzorek [29]. V této části je uveden příklad tohoto určení reabsorpce pro dva vzorky LSC s barvivem Lumogen Orange 240. Výsledky z těchto měření budou následně porovnány s výsledky vyhodnocení reabsorpce při celoplošném osvětlování vzorku bílým světlem.

Na obrázku 4.5 jsou nanormovaná fluorescenční spektra na spektrum 1. generace. Lze pozorovat, že při umístění paprsku laseru blízko aktivní hrany (např. 2 mm) má fluorescenční spektrum nejvyšší intenzitu. To je způsobeno tím, že emitované fotony mají kratší optickou dráhu k hraně koncentrátoru, a tudíž je v tomto případě menší pravděpodobnost reabsorpce.



**Obrázek 4.5.** Emisní spektra vzorků s barvivem Lumogen Orange 240 při osvětlování bodovým laserem, který byl posunován směrem od aktivní hrany s krokem 2 mm. Vlevo vzorek s  $c = 10^{-2}$  M, vpravo vzorek s  $c = 10^{-3}$  M. Spektra okrajové fluorescence normována tak, aby splývala se spektrem 1. generace.

Grafické znázornění pravděpodobnosti reabsorpce pro každé umístění laseru je na obrázku 4.6. Rozsah svíslé osy je zaměřen na relevantní oblast. Protože neznáme závislost pravděpodobnosti reabsorpce na poloze paprsku laseru, nejsou body proloženy křivkou. Vypočtené hodnoty průměrné pravděpodobnosti reabsorpce jsou v tabulce 4.4. V porovnání s hodnotami pravděpodobnosti reabsorpce stejných vzorků při osvětlování bílým světlem jsou tyto hodnoty téměř o 5 % nižší.



**Obrázek 4.6.** Pravděpodobnost reabsorpce vzorků s barvivem Lumogen Orange 240 při osvětlování bodovým laserem v závislosti na poloze laseru od aktivní hrany s krokem 2 mm. Vlevo pro vzorek s  $c = 10^{-2}$  M, vpravo pro vzorek s  $c = 10^{-3}$  M.

Barvivo	$c$ (M)	$R$ (%)
Lumogen Orange 240	$10^{-2}$	69,9
Lumogen Orange 240	$10^{-3}$	45,6

**Tabulka 4.4.** Vypočtené hodnoty pravděpodobnosti reabsorpce dvou vzorků s barvivem Lumogen Orange 240 při osvětlování laserem.

## 4.4 Výpočty a výsledky

Z provedených měření jsou nyní k dispozici potřebná data o absorpčních vlastnostech vzorků a vypočtené hodnoty pravděpodobnosti reabsorpce. S použitím vztahů z teoretické části dojde v této podkapitole k výslednému určení účinností absorpce a kolekce každého vzorku. Po výpočtu těchto účinností bude následovat také určení celkové optické účinnosti všech vzorků.

### 4.4.1 Účinnost kolekce

Vypočtené hodnoty pravděpodobnosti reabsorpce všech vzorků v tabulce 4.3 budou nyní dosazeny do vztahu (17) z teoretické části, kterým spočítáme účinnost kolekce. Dle [8] je kvantový výtěžek pro Coumarin 314 roven 80 %. Pro Lumogen Orange 240 je roven 99 % a pro Lumogen Red 305 je roven 98 % dle [30]. Pravděpodobnost ztrát únikovým kuželem je pro všechny vzorky stejná a při uvažování indexu lomu skla  $n_1 = 1,5$  se spočítají dle vztahu (16) z teoretické části jako

$$P = 1 - \sqrt{\frac{n_1^2 - 1}{n_1^2}} = 1 - \sqrt{\frac{1,5^2 - 1}{1,5^2}} = 0,255. \quad (4)$$

Nyní jsou k dispozici všechny potřebné hodnoty a lze spočítat účinnost kolekce pro každý vzorek LSC. Z výsledných hodnot v tabulce 4.5 vidíme, že účinnost kolekce roste s klesající koncentrací barviva. To souvisí s tím, že pravděpodobnost reabsorpce roste s rostoucí koncentrací. Je zde patrné, že barvivo Lumogen Red 305 má nejvyšší hodnoty účinnosti kolekce v porovnání s ostatními použitými fluorescenčními barvivy. Pravděpodobně kvůli nižší hodnotě kvantového výtěžku má barvivo Coumarin 314 nižší hodnoty účinnosti kolekce.

Barvivo	$c$ (M)	$Q_C$ (%)
Coumarin C314	$10^{-2}$	23,9
	$3 \cdot 10^{-3}$	37,3
	$10^{-3}$	42,0
	$10^{-4}$	51,9
Lumogen Orange 240	$10^{-2}$	42,2
	$10^{-3}$	58,3
	$10^{-4}$	64,3
Lumogen Red 305	$10^{-2}$	46,4
	$2 \cdot 10^{-3}$	56,3
	$10^{-3}$	58,6
	$2 \cdot 10^{-4}$	67,2
	$10^{-4}$	68,7

**Tabulka 4.5.** Vypočtené hodnoty účinnosti kolekce jednotlivých vzorků.

#### 4.4.2 Účinnost absorpce

Účinnost absorpce jednotlivých vzorků se spočítá použitím vztahu (21) z teoretické části s použitím změřeného referenčního spektra a absorbance vzorků. V tabulce 4.6 vidíme, že účinnost absorpce roste s rostoucí koncentrací barviva. To je způsobeno tím, že při vyšší koncentraci barviva je větší množství absorbujících částic. Vzhledem k třem použitým barvivům vychází nejlepší účinnost absorpce u barviva Lumogen Red 305 a nejhorší u Coumarinu 314.

Barvivo	$c$ (M)	$Q_A$ (%)
Coumarin C314	$10^{-2}$	19,9
	$3 \cdot 10^{-3}$	10,4
	$10^{-3}$	8,3
	$10^{-4}$	5,2
Lumogen Orange 240	$10^{-2}$	26,5
	$10^{-3}$	11,1
	$10^{-4}$	9,6
Lumogen Red 305	$10^{-2}$	48,4
	$2 \cdot 10^{-3}$	22,1
	$10^{-3}$	16,2
	$2 \cdot 10^{-4}$	9,4
	$10^{-4}$	8,3

**Tabulka 4.6.** Vypočtené hodnoty účinnosti absorpce jednotlivých vzorků.

#### 4.4.3 Optická účinnost

Dle vztahu (22) z teoretické části se optická účinnost LSC spočítá jako součin účinnosti kolekce a účinnosti absorpce. Oba tyto činitele máme již pro všechny vzorky zjištěné. V tabulce 4.7 jsou výsledné hodnoty optické účinnosti pro jednotlivé vzorky.

Barvivo	$c$ (M)	$\eta$ (%)
Coumarin C314	$10^{-2}$	3,5
	$3 \cdot 10^{-3}$	3,9
	$10^{-3}$	3,5
	$10^{-4}$	2,7
Lumogen Orange 240	$10^{-2}$	11,2
	$10^{-3}$	6,5
	$10^{-4}$	6,1
Lumogen Red 305	$10^{-2}$	22,4
	$2 \cdot 10^{-3}$	12,5
	$10^{-3}$	9,5
	$2 \cdot 10^{-4}$	6,3
	$10^{-4}$	5,7

**Tabulka 4.7.** Vypočtené hodnoty optické účinnosti jednotlivých vzorků.

## 4.5 Aproximace výsledků modelem

V současnosti existuje několik modelů pro LSC. Motivace použití modelu v této práci vychází z toho, že v praxi by nebylo nutné měřit reabsorpci, pokud bychom znali model, který by dokázal predikovat optickou účinnost pouze z vlastností fluorescenčních barviv. Experimentální hodnoty zde budou sloužit k ověření, zda zjednodušený model, který je v práci použit, funguje.

### 4.5.1 Aproximace pravděpodobnosti reabsorpce a účinnosti kolekce

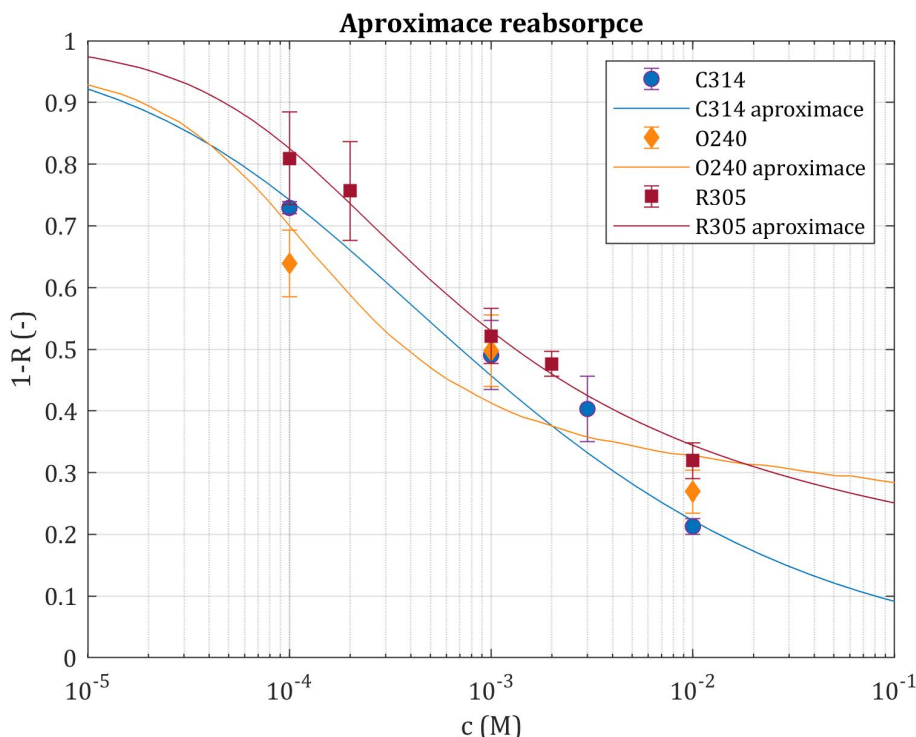
Již v roce 1976 vyšla publikace [31], ve které Weber a Lambe uvádějí matematické vztahy pro modelování účinnosti kolekce LSC na bázi organických barviv. Později tento model upravili Batchelder a Zewail [32]. Dále také existuje například Markvartův model [10]. Do těchto modelů je ale nutné dosadit změřené hodnoty pravděpodobnosti reabsorpce, a proto je důležité najít metodu vyhodnocení reabsorpce bez nutnosti měření – to se provádí například simulacemi ray tracing nebo metodou Monte Carlo [10, 29–30, 33]. V této práci je použit Markvartův model účinnosti kolekce, který bude v této části rozšířen o aproximaci výpočtu reabsorpce vztahem (5), publikovaným na letošní konferenci [34]. Vztah vypadá takto:

$$1 - r(\lambda) = \frac{1 - e^{-2l\alpha(\lambda)}}{2l\alpha(\lambda)}. \quad (5)$$

Pomocí rovnice (5) lze aproximovat pravděpodobnost reabsorpce v závislosti na koncentraci barviva v tenké vrstvě. Je nutné zmínit, že ve vztahu vystupuje veličina  $r(\lambda)$ , která popisuje pravděpodobnost reabsorpce pro jednu konkrétní vlnovou délku. Měření získáváme průměrnou pravděpodobnost reabsorpce  $R$  v celém rozsahu vlnových délek. Integrací spektrální pravděpodobnosti reabsorpce přes celý rozsah vlnových délek se získá průměrná pravděpodobnost reabsorpce dle vztahu (14) z teoretické části.

V rovnici (5) také vystupuje absorpční koeficient  $\alpha(\lambda)$  a optická dráha  $l$ . Zde je možné vidět souvislost s Lambert-Beerovým zákonem, který byl zmíněn v teoretické části rovnicí (13). Tento zákon platí pouze pro monochromatické světlo, a proto zde vidíme absorpční koeficient, který je funkcí vlnové délky (přestože název říká, že se jedná o *koeficient*, jde o funkci).

K této práci je přiložen kód vytvořený v prostředí MATLAB, který pro dané barvivo počítá ze známého absorpčního spektra, spektra 1. generace a Stokesova posunu závislost průměrné pravděpodobnosti reabsorpce na koncentraci. To je učiněno v několika krocích. Nejprve je namodelováno absorpční spektrum a spektrum 1. generace každého barviva pomocí gaussových křivek. Poté je vypočítána spektrální pravděpodobnost reabsorpce každého barviva s použitím vztahu (5). Člen  $l\alpha(\lambda)$  je dán tvarem absorpčního spektra. S použitím modelovaného absorpčního spektra je získána závislost spektrální pravděpodobnosti reabsorpce na členu  $l\alpha(\lambda)$ , nicméně konkrétní číselné hodnoty tohoto členu nejsou známy. Po integraci se vykreslí pravděpodobnost reabsorpce v závislosti na členu  $l\alpha(\lambda)$  a tato křivka se naškáluje na experimentální hodnoty vykreslené v závislosti na koncentraci  $c$ . Výsledkem je aproximace závislosti průměrné pravděpodobnosti reabsorpce na koncentraci daného barviva. To je znázorněno na obrázku 4.7, ve kterém jsou tyto závislosti v jednom grafu pro všechna barviva, aby mohlo dojít k porovnání reabsorpce mezi barvivy. V příloze na obrázku B.3 je tento graf rozdělen pro přehlednost do tří jednotlivých grafů.



**Obrázek 4.7.** Aproximace změřených hodnot pravděpodobnosti reabsorpce pro všechny vzorky s použitými třemi fluorescenčními barvivy v jednom grafu (modře – Coumarin 314, oranžově – Lumogen Orange 240, červeně – Lumogen Red 305). Odhadované absolutní odchylky změřených hodnot jsou znázorněny pomocí chybových úseček. Svislá osa – pravděpodobnost reabsorpce ve tvaru  $1 - R (-)$ , vodorovná osa – koncentrace barviva (M).

S použitím vztahu (17) z teoretické části lze s použitím aproximace pravděpodobnosti reabsorpce určit také aproximační křivku účinnosti kolekce, protože známe hodnotu kvantového výtěžku použitých barviv a velikost ztrát únikovým kuzelem. Změřené hodnoty účinnosti kolekce (v tabulce 4.5) by měly této aproximaci odpovídat podobně jako odpovídají změřená data pravděpodobnosti reabsorpce aproximaci pravděpodobnosti reabsorpce. Aproximaci účinnosti kolekce můžeme vidět na obrázku 4.8.

## 4.5.2 Aproximace účinnosti absorpce

Účinnost absorpce bude pro každé barvivo aproximována vztahem

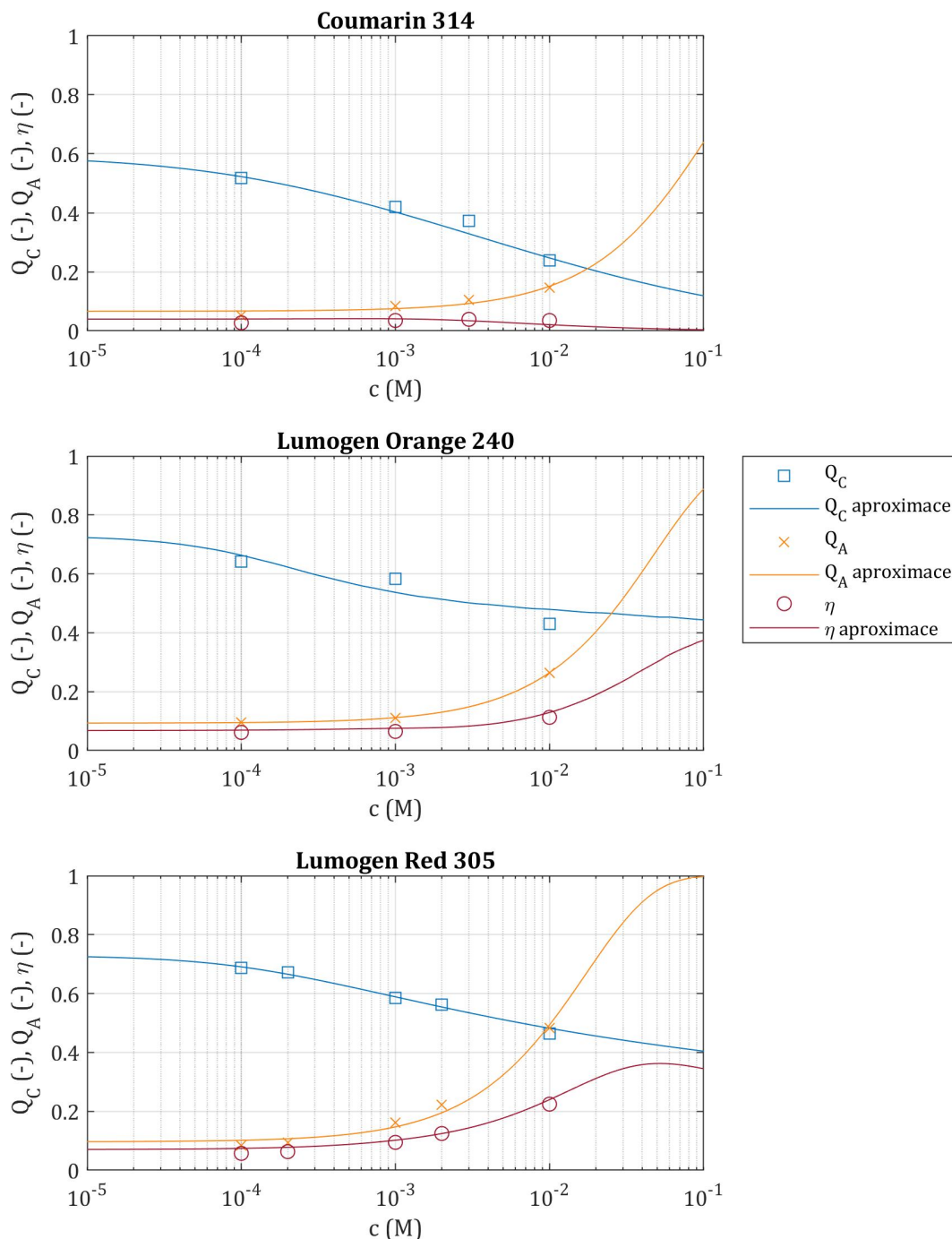
$$Q_{A, \text{aprox}} = 1 - e^{-K_1 - K_2 c} = 1 - C_1 e^{-K_2 c}, \quad (6)$$

který vychází ze vztahu pro účinnost absorpce (21) v teoretické části a Lambert-Beerova zákona (vztah (13) v teoretické části), který platí pouze pro monochromatické světlo a pro nízké koncentrace absorbujících částic. Předpokládáme, že koncentrace barviva na našich vzorcích je dostatečně nízká. Absorpční koeficient by byl pravděpodobně pro každou vlnovou délku jiný a to v aproximačním vztahu způsobuje odchylku od Lambert-Beerova zákona. Dále je nutné dodat, že při měření absorbance vzorků byla v těchto měřeních zahrnuta také absorpce maticí a odražená část vstupujícího záření, které účinnost absorpce nepatrně zvyšují.

Změřené hodnoty účinnosti absorpce vzorků s koncentrací barviva  $c$  (v tabulce 4.6) se proloží touto aproximační funkcí s parametry  $K_1$  a  $K_2$  (respektive  $C_1$  a  $K_2$ ). Stejně jako aproximace pravděpodobnosti reabsorpce a účinnosti kolekce je uvedena aproximace účinnosti absorpce v příloženém MATLAB kódu a graficky je znázorněna na obrázku 4.8.

### 4.5.3 Aproximace celkové optické účinnosti

Aproximacemi účinností kolektce a absorpce získáme dvě funkce závislé na koncentraci, jejichž součinem je aproximace optické účinnosti dle vztahu (22) z teoretické části. Výsledné aproximační křivky tří zmíněných účinností, které vycházejí z výpočtu v MATLAB kódu, jsou pro každé barvivo znázorněny na obrázku 4.8.



**Obrázek 4.8.** Aproximace změřených hodnot účinnosti kolektce (modře), účinnosti absorpce (žlutě) a optické účinnosti (červeně) LSC v závislosti na koncentraci barviva (odshora barviva: Coumarin 314, Lumogen Orange 240, Lumogen Red 305).



# Kapitola 5

## Diskuze

V této kapitole bude provedena diskuze nad zvolenými postupy a jejich správností při zpracování zejména praktické části této práce. Dále bude diskutována správnost výsledků a použití modelu pro pravděpodobnost reabsorpce.

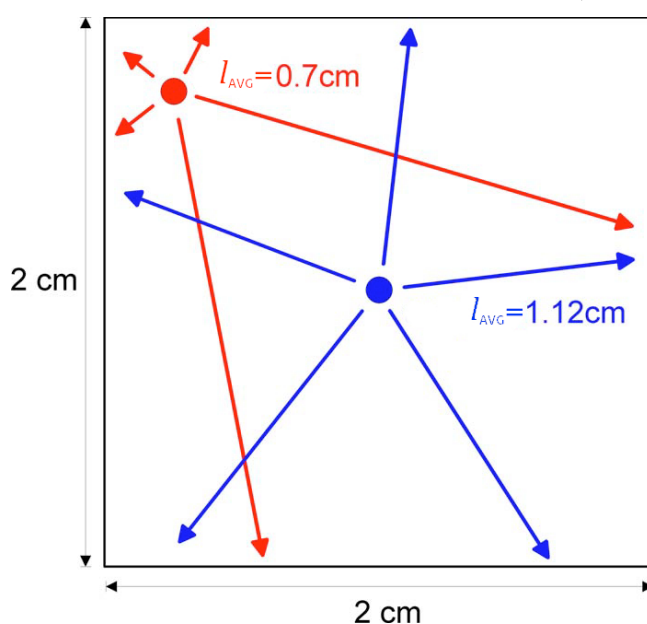
V první řadě zmíním samotnou **přípravu vzorků LSC a výběr barviv**. Pro tuto práci byla zvolena tři organická fluorescenční barviva (Coumarin 314, Lumogen Orange 240 a Lumogen Red 305), která pokrývají viditelnou část spektra, ale zejména pokrývají část spektra vhodnou pro PV články. Zároveň jsou jejich absorpční a emisní spektra vůči sobě posazena jinak a mají odlišný Stokesův posun. Z parametrů těchto barviv byly zvoleny koncentrace roztoků, které se následně nanasly formou tenké vrstvy na skleněné matrice. Za použití laboratorních vah a pipet bylo dosaženo po výpočtu dostatečné přesnosti koncentrace roztoků a výpar toluenu z těchto připravených roztoků byl omezen použitím laboratorní fólie na závitech nádob. Před nanášením vrstvy barviva na sklíčka se do roztoků přidával PMMA. Rozpustnost PMMA v toluenu nebyla zcela stoprocentní, a přestože byla použita ultrazvuková čistička pro míchání roztoků s PMMA, tak došlo u některých vzorků k tomu, že po nanesení roztoku na sklíčko zůstaly v této vrstvě malé krystaly PMMA. Tyto lokální nedokonalosti tenké vrstvy by ale nejspíš neměly mít vliv na výsledky měření. Z důvodu malého počtu sklíček, která se používala na matrice vzorků, byly připraveny pouze tři vzorky s barvivem Lumogen Orange 240. Bylo by lepší mít více vzorků, ale jelikož zvolené koncentrace pokrývají stejný rozsah jako u vzorků s ostatními barvivy, na charakterizaci vlastností tohoto barviva to nemělo zásadní vliv.

V další části se zaměřím na **přesnost měření**. Všechna měření probíhala v temné místnosti laboratoře katedry elektrotechnologie, ve které nejsou okna a zdi jsou vymalované černou barvou s nízkou odrazivostí. Z tohoto pohledu bylo při měření dosaženo velmi nízkého pozadí, které ovlivnilo výsledky měření jen velmi málo. Před každým měřením se měřící přístroje automaticky zkalibrovaly. Všechna měření probíhala v měřitelném rozsahu použitých přístrojů.

Dalším bodem k diskuzi jsou použité **měřící metody**. V této práci nebyla provedena žádná měření odraženého záření od vzorků. Důvodů k tomuto zanedbání reflektovaného záření je více. Prvním důvodem je to, že ztráty odrazem dosahují dle [3] přibližně 4 %. Druhým důvodem je nesnadné měření těchto ztrát a třetím důvodem je to, že jsme použili pro vyhodnocení optické účinnosti teorii, která tyto ztráty také zanedbává. Nicméně při měření absorpčních vlastností vzorků se část světelného toku absorbovala, část prošla vzorkem a část se také odrazila – tuto odraženou část tedy zahrnujeme do účinnosti absorpce, ale jelikož jsou ztráty odrazem velmi malé, tak vliv této chyby není na výsledek závažný.

Při měření fluorescenčních vlastností vzorků byly použity **dvě metody vyhodnocení pravděpodobnosti reabsorpce**, která je významným ztrátovým mechanismem LSC s organickými barvivy. V obou metodách byla zanedbána reabsorpce v únikovém kuželu  $\bar{R}$ . Toto zanedbání je zdůvodnitelné tím, že byly připraveny tenkovrstvé LSC, u kterých je barvivo ve velmi tenké vrstvě, a tudíž předpokládáme, že hodnota  $\bar{R}$  bude velmi nízká

a nedojde k ovlivnění výsledku při jejím zanedbání. První metoda spočívala v tom, že na celou vrchní stěnu vzorku se svítilo širokospektrálním světlem, které vyzařovalo v celém měřicím rozsahu vlnových délek. Volba tohoto způsobu je zdůvodnitelná praktickým použitím LSC – v praxi dopadá na LSC širokospektrální záření a na celou jeho plochu. Problém u této metody nastával s tím, že část světla ze zdroje světla dopadala do kulového integrátoru. Tento vliv byl omezen změřením emisního spektra čistého sklíčka a toto spektrum bylo bráno jako pozadí, které se od fluorescenčních spekter odečetlo. Úvaha, že toto pozadí je pro vzorky s vrstvou barviva stejné, není zcela správná, protože připravené vzorky mají pravděpodobně odlišnou míru odrazu a rozptylu dopadajícího záření. I z tohoto důvodu bylo při vyhodnocování pravděpodobnosti reabsorpce provedeno několik alternativ k normování fluorescenčních spekter na spektrum 1. generace daného barviva (nejlepší alternativa tohoto normování je na obrázku B.2) a byly určeny odhady absolutní chyby pravděpodobnosti reabsorpce (v tabulce 4.3).



**Obrázek 5.1.** Znázornění průměrné optické dráhy  $l_{AVG}$  pro dva případy bodového laserového ozařování koncentrátoru o rozměrech  $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ . Protože částice barviva emitují izotropně, průměrná optická dráha je delší než přímá dráha k nejbližší aktivní hraně. Průměrná optická dráha je nejdelší ve středu vzorku (1,12 cm). [35] (upraveno)

Častěji používaná metoda určování pravděpodobnosti reabsorpce, která byla provedena u dvou vzorků pro porovnání s první zmíněnou metodou, spočívá v tom, že se určí průměrná pravděpodobnost reabsorpce z naměřených fluorescenčních spekter při osvětlování bodů na vzorku laserem. Na rozdíl od první metody zde nebylo žádné pozadí, které by výrazně ovlivnilo měření. Nicméně výsledky pravděpodobnosti reabsorpce pro tuto metodu jsou přibližně o 5 % nižší oproti pravděpodobnosti reabsorpce stejných vzorků při určování první metodou. Je otázkou, co zapříčinilo tento rozdíl – jednou z možností je zmíněné nepřilíš přesné normování u první metody. Druhou možností je teorie k této „laserové“ metodě, která určuje pravděpodobnost reabsorpce z měření ekvidistantně osvětlovaných bodů na vzorku jako průměr pravděpodobnosti reabsorpce ve všech bodech. Pokud bychom proložili výsledné hodnoty pravděpodobnosti reabsorpce určené druhou metodou na obrázku 4.6 přímkou, tak by se pravděpodobně změřené body od této přímky mírně odchylovaly (odhaduji, že průměrná pravděpodobnost reabsorpce by mohla mít odchylku o nižší jednotky procent), takže lze usoudit, že určení průměrné pravděpodobnosti reabsorpce touto druhou metodou také není zcela

dokonalé. Na obrázku 5.1 je ještě znázorněna průměrná optická dráha fotonu  $l_{AVG}$  při laserovém ozařování vzorku ve dvou různých bodech. Naše měření probíhalo po středové linii a pokud by se měřilo mimo tuto linii, optická dráha by byla pravděpodobně kratší a tedy reabsorpce nižší – naše hodnoty by tedy měly být spíše nadhodnocené, ale jak již bylo zmíněno, touto metodou jsme se dostali k nižším hodnotám pravděpodobnosti reabsorpce oproti metodě s celoplošným ozařováním. Rozdíl bude tedy způsoben něčím jiným. Další možností by mohla být rozdílná odrazivost jednotlivých vlnových délek bílého světla – toto by se mohlo objasnit dalšími měřeními, při kterých by se celá plocha vzorku osvětlovala monochromatickým světlem různých vlnových délek.

Dalším tématem k diskuzi je **měřicí rozsah**. Zvolený rozsah 300-850 nm byl pro všechna měření stejný. Interval vlnových délek má ale zásadní vliv na hodnoty účinnosti absorpce (a tedy i celkové optické účinnosti), které při menším rozsahu vycházejí větší oproti stavu, při kterém by byl zvolen větší rozsah. Aby byly výsledky porovnatelné s ostatními publikacemi o tomto tématu, bylo by možné uvažovat rozsah vlnových délek v celém intervalu standardizovaného solárního spektra AM1.5, které se používá pro PV měření. Tento rozsah odpovídá cca 200-2500 nm. Některá měření by nebylo nutné provádět v širším rozsahu, ale pouze by se při výpočtech uvažoval širší interval vlnových délek.

V dalším bodě diskuze zhodnotím **aproximaci pravděpodobnosti reabsorpce** (a související účinnosti kolekce). Vypočtené hodnoty pravděpodobnosti reabsorpce byly aproximovány teoretickým vztahem (5) pro spektrální pravděpodobnost absorpce. Této aproximaci předcházelo modelování absorpčních a emisních spekter použitých barviv podle jejich změřených charakteristik. Z výsledného grafu B.3 lze konstatovat, že tato aproximace (doposud nepublikovaná) dobře prokládá změřené hodnoty pravděpodobnosti reabsorpce. V grafu 4.7 lze pozorovat, že tvar závislosti pravděpodobnosti reabsorpce na koncentraci barviva je pro barvivo Lumogen Orange 240 odlišný oproti zbylým dvěma barvivům. To bude pravděpodobně způsobeno tím, že absorpční a emisní spektrum tohoto barviva sestává z více gaussovských pásů, které byly zahrnuty v teoretickém modelování spektra. Po aproximaci pravděpodobnosti reabsorpce došlo pomocí teoretického vztahu k **aproximaci účinnosti kolekce** a podle grafu 4.8 můžeme zhodnotit, že proklad experimentálních hodnot účinnosti kolekce touto aproximací je dobrý.

Dalším krokem vyhodnocení byla **aproximace účinnosti absorpce**. Experimentální hodnoty účinnosti absorpce připravených vzorků byly aproximovány teoretickým vztahem, který vychází z Lambert-Beerova zákona. Při měření absorpčních vlastností vzorků byla v hodnotách absorbance zahrnuta i odražená část světla od vzorku a absorpce maticí. Tyto části mohou nepatrně zvýšit hodnoty účinnosti absorpce. Odhaduji, že by se mohlo jednat o nižší jednotky procent, což se projeví zejména u malých koncentrací barviva. Aby výsledky účinnosti absorpce odpovídaly pouze absorpci částicemi barviva, bylo by možné změřit referenční spektrum pro vzorek, který by na sobě měl nanasenu pouze tenkou vrstvu PMMA bez barviva. Z grafu 4.8 lze vidět, že zvolená aproximace odpovídá vypočteným hodnotám. Po provedení součinu aproximací účinnosti absorpce a kolekce byla získána **aproximace celkové optické účinnosti**, která dobře prokládá experimentální hodnoty.

# Kapitola 6

## Závěr

Tato práce je zaměřena na studium a přípravu LSC na bázi organických barviv pro jejich využití ve fotovoltaice. S použitím LSC v PV systémech by mohlo dojít ke zvýšení jejich účinnosti a ke snížení spotřeby křemíku. Jednou z výhod LSC je jejich účinná koncentrace difuzního světla, a proto by mohly být využity i v oblastech s vyšší oblačností. Práce se skládá z části, zabývající se současným stavem poznání v oblasti LSC, teoretické části, která dává teoretický základ pro pochopení principu LSC, a praktické části, ve které bylo připraveno několik vzorků LSC, jejichž vlastnosti byly následně charakterizovány. Správnost výsledků a použité metody jsou zhodnoceny v diskuzi.

Prvním cílem této práce bylo nastudovat **současný stav poznání v oblasti LSC**. V kapitole 2 byl popsán historický vývoj poznání LSC a typy, které jsou v současnosti známé a perspektivní. Z tohoto textu také vyplývá motivace pro použití LSC na bázi organických barviv v současné době a výhody této technologie. Dále byla zmíněna poměrně nová technologie tenkovrstvých LSC, které byly v praktické části této práce připraveny a popisovány.

V kapitole 3 byl vysvětlen princip funkce LSC a byly popsány optické vlastnosti LSC. Dále byla v této kapitole věnována pozornost způsobu popisu vlastností LSC a proběhlo určení ztrátových mechanismů spojených s tímto druhem koncentrace světla. Vzhledem k cílům této práce byly zvoleny a popsány způsoby určení pravděpodobnosti reabsorpce, která je jedním z důležitých ztrátových procesů LSC na bázi organických barviv, a způsob určení celkové optické účinnosti LSC, který byl upraven pro připravené tenkovrstvé LSC. Z tohoto teoretického základu vyplynuly veličiny, které bylo potřebné určit pro charakterizaci vzorků LSC a následné určení optické účinnosti.

Druhým cílem práce byla **příprava vzorků LSC**. Tento proces je podrobně popsán v kapitole 4, která zahrnuje praktickou část této práce. Před samotnou přípravou vzorků byla zvolena tři fluorescenční organická barviva, která jsou použitelná pro LSC. Konkrétně jde o Coumarin 314, Lumogen Orange 240 a Lumogen Red 305. Díky volbě více použitých barviv lze tato barviva následně vzájemně porovnat. V praktické části došlo k přípravě 13 roztoků barviv s různou koncentrací a jejich nanesení na skleněné matrice ve formě tenké vrstvy s použitím rotačního nanášení. S těmito vzorky se následně pracovalo při měřeních.

Třetím cílem byla **charakterizace spektrálních vlastností připravených vzorků LSC a zvolení vhodného postupu vyhodnocení reabsorpce**. V kapitole 4 byla provedena spektroskopická měření pro určení absorpčních a fluorescenčních vlastností použitých barviv a připravených vzorků. Na obrázku 4.3 jsou znázorněna absorpční spektra a spektra 1. generace použitých barviv, která definují jejich základní charakteristiku – šířku spektra, rozsah vlnových délek, tvar spektra, Stokesův posun a překryv. Lze vidět, že barviva jsou od sebe výrazně odlišná. Dále byla provedena měření pro charakterizaci fluorescenčních spekter vzorků LSC a data z těchto měření byla následně použita pro vyhodnocení pravděpodobnosti reabsorpce. Jelikož bylo cílem zvolit vhodný postup vyhodnocení reabsorpce, byly použity dvě metody tohoto vyhodnocení. Obě metody mají své výhody a nevýhody, které byly podrobněji popsány v diskuzi. Výsledné prav-

děpodobnosti reabsorpce jsou pro obě metody v tabulkách 4.3 a 4.4, ve kterých lze pozorovat, že s rostoucí koncentrací barviva roste také pravděpodobnost reabsorpce. Z těchto tabulek je také možné vidět rozdíl výsledků zvolených metod, jehož příčině se podrobněji věnuji v diskuzi. Jako doplnění k těmto měřením byl použit nový model aproximace pravděpodobnosti reabsorpce, který je dán vztahem (5) v praktické části. Dle grafů 4.7 a B.3 lze usoudit, že aproximace tímto modelem dobře prokládá experimentální hodnoty. Toto ověření modelu může vést k tomu, že v budoucnu nebude nutné měřit pravděpodobnost reabsorpce vzorků, ale bude stačit použít modelem získané hodnoty pravděpodobnosti reabsorpce. Pro úplnost je k této práci přiložen MATLAB kód, ve kterém byl tento model spočítán s využitím změřených vlastností použitých fluorescenčních barviv – Stokesova posunu a absorpčního spektra.

Čtvrtým a posledním cílem práce bylo **zvolení vhodné teorie pro aproximaci a vyhodnocení optické účinnosti LSC**. Zvolená metoda vyhodnocení optické účinnosti je popsána v kapitole 3. Tato metoda říká, že optická účinnost LSC se určí ze součinu účinnosti kolekce a účinnosti absorpce daného vzorku. S použitím změřených pravděpodobností reabsorpce vzorků a jejich absorpčních vlastností byla vypočtena celková optická účinnost vzorků, která je v tabulce 4.7. Aby bylo možné říct, že zvolená metoda určení optické účinnosti byla vhodná, byl v kapitole 4 použit zmíněný model pro aproximaci pravděpodobnosti reabsorpce doplněný o aproximaci účinnosti absorpce. Použitím těchto aproximací byla vytvořena také aproximace optické účinnosti. Z grafu 4.8 lze vidět, že tato aproximace dobře odpovídá změřeným hodnotám, takže tvrdím, že byla zvolena vhodná teorie vyhodnocení optické účinnosti.

Pro úplnost dále zhodnotím číselné výsledky, které byly v praktické části práce zjištěny. Barvivo Coumarin 314 má posazena absorpční a fluorescenční spektra v rozsahu nejnižších vlnových délek – přibližně 350-550 nm. Toto barvivo má v porovnání s ostatními použitými barvivy nejnižší kvantový výtěžek (80 %) a v kombinaci s vysokou pravděpodobností reabsorpce má také nejnižší hodnoty účinnosti kolekce. Přestože toto barvivo má z použitých barviv největší Stokesův posun 41 nm, nízká hodnota kvantového výtěžku měla větší vliv na nízké hodnoty účinnosti kolekce. Největší optické účinnosti 3,9 % bylo dosaženo u vzorku s koncentrací barviva  $3 \cdot 10^{-3}$  M. Zdá se tedy, že toto barvivo nebude příliš vhodné pro LSC. Barvivo Lumogen Orange 240 má absorpční a fluorescenční spektrum složené z dvou maxim a posazení těchto spekter je v rozsahu asi 450-650 nm. Toto barvivo má nejvyšší kvantový výtěžek (99 %) z použitých barviv a zároveň nejmenší Stokesův posun 10,5 nm. Hodnoty účinnosti kolekce jsou poměrně velké, nicméně nižší hodnoty účinnosti absorpce mají za následek horší optickou účinnost – nejvyšší hodnota optické účinnosti 11,2 % byla zjištěna u vzorku s koncentrací barviva  $10^{-2}$  M. Z použitých barviv se jeví nejperspektivněji barvivo Lumogen Red 305. Toto barvivo absorbuje v oblasti přibližně 500-600 nm a jeho fluorescenční spektrum je v rozsahu přibližně 550-700 nm. Barvivo Lumogen Red 305 má velmi vysokou hodnotu kvantového výtěžku (98 %) a Stokesův posun činí 25 nm. U vzorků s tímto barvivem bylo dosaženo největších hodnot účinnosti kolekce a absorpce, což se projevilo také na nejvyšších hodnotách optické účinnosti. Ta byla největší u vzorku s koncentrací  $10^{-2}$  M a činila 22,4 %.

Důležitým závěrem je, že účinnost kolekce s rostoucí koncentrací barviva klesá vlivem rostoucí reabsorpce. Naproti tomu s rostoucí koncentrací roste účinnost absorpce. Tyto dva jevy jdou proti sobě a lze usoudit, že pro danou velikost koncentrátoru a dané barvivo bude optimální koncentrace, při které bude LSC dosahovat nejvyšší optické účinnosti, odlišná. Z grafu 4.8 lze vidět, že pro barviva Lumogen Orange 240 a Red 305 je tato optimální koncentrace pro danou velikost LSC blízko hodnoty  $10^{-1}$  M. Závěrem

je vhodné připomenout sdělení z diskuze, že hodnoty optických účinností jsou poměrně vysoké, protože se vztahují k rozsahu vlnových délek 300-850 nm.

Pokud by se na tuto práci nějakým způsobem navázalo, bylo by zajímavé sestavit model, který určí optimální koncentraci v závislosti na velikosti LSC. Další možností by mohlo být vytvoření PV systému, který by sestával z LSC a PV článků připevněných na menší stěny koncentrátoru, a porovnání jeho vlastností a ekonomických aspektů oproti konvenčním PV článkům o stejné ploše, na kterou dopadá sluneční záření. Dalším zajímavým pokračováním této práce by bylo využití tří použitých barviv ve formě vícevrstevných LSC (multi-stack) nebo kombinací těchto barviv již v nanášeném roztoku. Mohl by tak vzniknout například koncentrátor, který by byl spektrálně přizpůsoben spektrální odezvě připojených PV článků. Z hlediska materiálového by bylo vhodné zkoumat degradaci samotných barviv pod slunečním světlem, která bývá u některých typů barviv významná – mohlo by dojít ke zhoršení vlastností LSC s časem. V oblasti LSC je tedy stále několik směrů, které by bylo možné do hloubky zkoumat, a s použitím nových poznatků možná časem dojde k vylepšení vlastností LSC a jejich rozšíření.

## Literatura

- [1] DEBIJE, Michael G. a Paul P. C. VERBUNT. Thirty Years of Luminescent Solar Concentrator Research: Solar Energy for the Built Environment. *Advanced Energy Materials*. 2012, ročník 2, č. 1, s. 12-35. Dostupné na DOI <https://doi.org/10.1002/aenm.201100554>. Dostupné na <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/aenm.201100554>.
- [2] LAIA, César a Andreia RUIVO. *Photoluminescent Glasses and Their Applications: Methods and Applications*. 2019. ISBN 978-3-030-20032-9. Dostupné na DOI 10.1007/4243\_2019\_12.
- [3] RONCALI, Jean. Luminescent Solar Collectors. *Advanced Energy Materials*. 2020, ročník 10, č. 36. ISSN 1614-6832. Dostupné na DOI 10.1002/aenm.202001907. Dostupné na <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aenm.202001907>.
- [4] CHATTEN, A. J., K. W. J. BARNHAM, B. F. BUXTON, N. J. EKINS-DAUKES a M. A. MALIK. Quantum dot solar concentrators. *Semiconductors*. 2004, ročník 38, s. 909-917. ISSN 1090-6479. Dostupné na DOI 10.1134/1.1787111. Dostupné na <https://doi.org/10.1134/1.1787111>.
- [5] ČERNÁ, Ladislava, Ivan KUDLÁČEK, Tomáš FINSTERLE, Pavel HRZINA, Vítězslav BENDA a Jan ŠUTKA. *Ekonomická bilance výroby a likvidace fotovoltaických modulů instalovaných v ČR*. Dostupné na [https://www.solarniasociace.cz/tmp/studie\\_cvut\\_bilance\\_solarni\\_panely.pdf](https://www.solarniasociace.cz/tmp/studie_cvut_bilance_solarni_panely.pdf).
- [6] *Photovoltaics Report*. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2022. Dostupné na <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>.
- [7] STRAŠKRABA, Vojtěch. *Koncentrátorové fotovoltaické systémy*. Vysoké učení technické v Brně, 2011. Bakalářská práce. Dostupné na [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=42920](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=42920).
- [8] TUMMELTSHAMMER, C., A. TAYLOR, A.J. KENYON a I. PAPAKONSTANTINOU. Losses in luminescent solar concentrators unveiled. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2016, ročník 144, s. 40-47. ISSN 09270248. Dostupné na DOI 10.1016/j.solmat.2015.08.008. Dostupné na <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927024815003955>.
- [9] HERNANDEZ-NOYOLA, Hermilo, David H. POTTERVELD, Roy J. HOLT a Seth B. DARLING. Optimizing luminescent solar concentrator design. *Energy Environ. Sci.* The Royal Society of Chemistry, 2012, ročník 5, s. 5798-5802. Dostupné na DOI 10.1039/C1EE02376D.
- [10] FANG, Liping. *Enhancing light absorption in silicon solar cells by fluorescent molecules*. University of Southampton, 2014. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy. Dostupné na [https://eprints.soton.ac.uk/370511/1/Thesis\\_Liping\\_FANG.pdf](https://eprints.soton.ac.uk/370511/1/Thesis_Liping_FANG.pdf).
- [11] *Plexisklo - popis plexiskla*. 2016. Dostupné na <https://www.koplast.cz/plexisklo-popis-plexiskla/>.

- [12] CORSINI, Francesca, Elisavet TATSI, Alessia COLOMBO, Claudia DRAGONETTI, Chiara BOTTA, Stefano TURRI a Gianmarco GRIFFINI. Highly emissive fluorescent silica-based core/shell nanoparticles for efficient and stable luminescent solar concentrators. *Nano Energy*. 2021, ročník 80, s. 105-551. ISSN 2211-2855. Dostupné na DOI <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105551>. Dostupné na <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285520311253>.
- [13] *Fluorescence*. Dostupné na <https://en.wikipedia.org/wiki/Fluorescence>.
- [14] *Foton*. Dostupné na <https://cs.wikipedia.org/wiki/Foton>.
- [15] LAKOWICZ, Joseph. *Principles of Fluorescence Spectroscopy*. 2006. ISBN 978-0-387-31278-1. Dostupné na DOI 10.1007/978-0-387-46312-4.
- [16] *Optics for PV*. Pietro P. Altermatt. Dostupné na [www.pvlighthouse.com.au/lectures/altermatt](http://www.pvlighthouse.com.au/lectures/altermatt).
- [17] *Snell's Law*. Dostupné na [https://en.wikipedia.org/wiki/Snell%27s\\_law](https://en.wikipedia.org/wiki/Snell%27s_law).
- [18] *Brechungsindex*. Dostupné na <https://de.wikipedia.org/wiki/Brechungsindex>.
- [19] CHALK, S. J. *Compendium of Chemical Terminology (Gold Book)*. 1997. ISBN 0-9678550-9-8. Dostupné na DOI 10.1351/goldbook.
- [20] *Radiometry*. Dostupné na <https://en.wikipedia.org/wiki/Radiometry>.
- [21] KONÍČEK, Petr. *Fotometrie*. Dostupné na <http://aldebaran.feld.cvut.cz/vyuka/konicek/F2-B1B02FY2/materialy/fotometrie.pdf>.
- [22] KITPIDACHACHAN, Pattareeya, Lefteris DANOS, Thomas J. J. MEYER, Nicolas ALDERMAN a Tom MARKVART. Photon Collection Efficiency of Fluorescent Solar Collectors. *CHIMIA International Journal for Chemistry*. 2007, ročník 61, č. 12, s. 780-786. ISSN 00094293. Dostupné na DOI 10.2533/chimia.2007.780.
- [23] MCEVOY, Augustin, T. MARKVART a Luis CASTAÑER. *Practical Handbook of Photovoltaics*. Second Edition vyd. 2012. ISBN 978-0-12-385934-1. Dostupné na DOI 10.1016/C2011-0-05723-X. Dostupné na <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123859341000015>.
- [24] *Molární koncentrace*. Dostupné na [https://cs.wikipedia.org/wiki/Mol%C3%A1rn%C3%AD\\_koncentrace](https://cs.wikipedia.org/wiki/Mol%C3%A1rn%C3%AD_koncentrace).
- [25] *Toluene*. Dostupné na <https://en.wikipedia.org/wiki/Toluene>.
- [26] HINDLEY, Emily. *Fabrication of Luminescent Solar Concentrators*. Lancaster University, 2018. Research Project.
- [27] SCRIVEN, L. E. Physics and Applications of DIP Coating and Spin Coating. *MRS Proceedings*. Cambridge University Press, 1988, ročník 121, s. 717. Dostupné na DOI 10.1557/PROC-121-717.
- [28] WIKISKRIPT. *Spektrofotometrie*. Dostupné na [https://www.wikiskripta.eu/index.php?title=Spektrofotometrie&ol\\_id=423160](https://www.wikiskripta.eu/index.php?title=Spektrofotometrie&ol_id=423160).
- [29] WILSON, Lindsay R., Brenda C. ROWAN, Neil ROBERTSON, Omar MOUDAM, Anita C. JONES a Bryce S. RICHARDS. Characterization and reduction of reabsorption losses in luminescent solar concentrators. *Appl. Opt. OSA*, 2010, ročník 49, č. 9, s. 1651-1661. Dostupné na DOI 10.1364/AO.49.001651. Dostupné na <http://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-49-9-1651>.
- [30] VAN SARK, Wilfried G.J.H.M., Keith W.J. BARNHAM, Lenneke H. SLOOFF, Amanda J. CHATTEN, Andreas BÜCHTEMANN, Andreas MEYER, Sarah J.



- MCCORMACK, Rolf KOOLE, Daniel J. FARRELL, Rahul BOSE, Evert E. BENDE, Antonius R. BURGERS, Tristram BUDEL, Jana QUILITZ, Manus KENNEDY, Toby MEYER, C. De Mello DONEGÁ, Andries MEIJERINK a Daniel VANMAEKELBERGH. Luminescent Solar Concentrators - A review of recent results. *Opt. Express*. OSA, 2008, ročník 16, č. 26, s. 21773–21792. Dostupné na DOI 10.1364/OE.16.021773. Dostupné na <http://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-16-26-21773>.
- [31] WEBER, Willes a John LAMBE. Luminescent greenhouse collector for solar radiation. *Applied optics*. 10, 1976, ročník 15, s. 2299-2300. Dostupné na DOI 10.1364/AO.15.002299. Dostupné na <http://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-15-10-2299>.
- [32] BATCHELDER, J. S., A. H. ZEWAİL a T. COLE. Luminescent solar concentrators 1: Theory of operation and techniques for performance evaluation. *Applied Optics*. 1979, ročník 18, č. 18, s. 5-10. ISSN 0003-6935. Dostupné na DOI 10.1364/AO.18.003090. Dostupné na <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=ao-18-18-3090>.
- [33] SANSREGRET, J., J. M. DRAKE, W. R. L. THOMAS a M. L. LESIECKI. Light transport in planar luminescent solar concentrators: the role of DCM self-absorption. *Appl. Opt.* OSA, 1983, ročník 22, č. 4, s. 573-577. Dostupné na DOI 10.1364/AO.22.000573. Dostupné na <http://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-22-4-573>.
- [34] DZURŇÁK, Branislav a Tom MARKVART. Universal Figure of merit for luminescent solar concentrators, prezentováno na Quantsol 2022. Rauris, Rakousko, 2022.
- [35] GOLDSCHMIDT, Jan Christoph, Marius PETERS, Martin HERMLE a Stefan W. GLUNZ. Characterizing the light guiding of fluorescent concentrators. *Journal of Applied Physics*. 2009, ročník 105, č. 11, s. 114911. Dostupné na DOI 10.1063/1.3125524. Dostupné na <https://doi.org/10.1063/1.3125524>.



# Příloha A

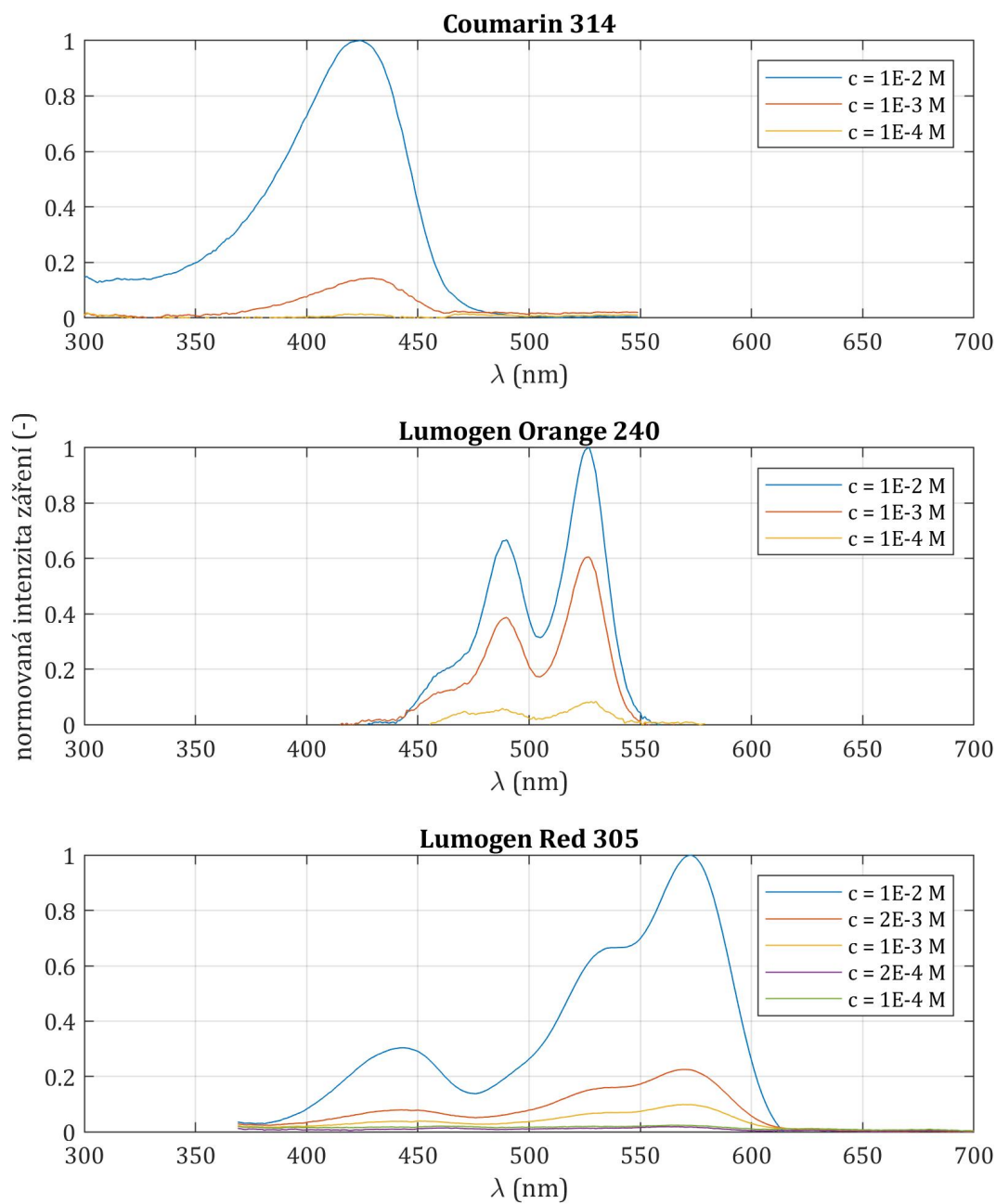
## Zkratky a symboly

$a$	■ Absorptance (-)
$A$	■ Absorbance (-)
$A_{\text{in}}$	■ Plocha vrchní stěny LSC ( $\text{mm}^2$ )
$A_{\text{out}}$	■ Plocha okrajových stěn LSC ( $\text{mm}^2$ )
$c$	■ Látková koncentrace (M)
$C$	■ Koncentrační faktor (-)
$c_0$	■ Rychlost šíření světla ve vakuu ( $3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ )
$E$	■ Energie fotonu (J)
$EQE$	■ Externí kvantová účinnost (-)
$f_1(\lambda)$	■ Normované spektrum 1. generace
$G$	■ Geometrický výtěžek (-)
$h$	■ Planckova konstanta ( $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$ )
$IQE$	■ Interní kvantová účinnost (-)
$I_e$	■ Intenzita záření ( $\text{W m}^{-2}$ )
$I_{\text{in}}$	■ Intenzita dopadajícího záření ( $\text{W m}^{-2}$ )
$I_{\text{out}}$	■ Intenzita koncentrovaného záření ( $\text{W m}^{-2}$ )
$l$	■ Optická dráha (cm)
$l_{\text{AVG}}$	■ Průměrná optická dráha (cm)
$m$	■ Hmotnost barviva (mg)
$M$	■ Molární hmotnost ( $\text{g mol}^{-1}$ )
$m_{\text{P}}$	■ Hmotnost PMMA (mg)
$m_{\text{T}}$	■ Hmotnost toluenu (mg)
$n$	■ Index lomu (-)
$N_{\text{Abs}}$	■ Počet absorbovaných fotonů (-)
$N_{\text{Work}}$	■ Počet užitečných vstupujících fotonů (-)
$N_0$	■ Celkový počet vstupujících fotonů (-)
$P$	■ Pravděpodobnost ztrát únikovým kuželem (-)
$Q_{\text{A, approx}}$	■ Aproximační funkce pro účinnost absorpce
$Q_{\text{A}}$	■ Účinnost absorpce (-)
$Q_{\text{C}}$	■ Účinnost kolekce (-)
$R$	■ Pravděpodobnost reabsorpce (-)
$r(\lambda)$	■ Spektrální pravděpodobnost reabsorpce
$S$	■ Plocha ( $\text{m}^2$ )
$\alpha, \alpha(\lambda)$	■ Absorpční koeficient ( $\text{cm}^{-1}$ )
$\Delta$	■ Odhadovaná absolutní chyba pravděpodobnosti reabsorpce (%)
$\eta$	■ Optická účinnost (-)
$\lambda$	■ Vlnová délka (m)
$\phi$	■ Zářivý tok, vystupující zářivý tok (W)
$\phi_{\text{a}}$	■ Absorbovaný zářivý tok (W)
$\phi_{\text{r}}$	■ Odražený zářivý tok (W)
$\phi_{\lambda}$	■ Spektrální zářivý tok ( $\text{W m}^{-1}$ )

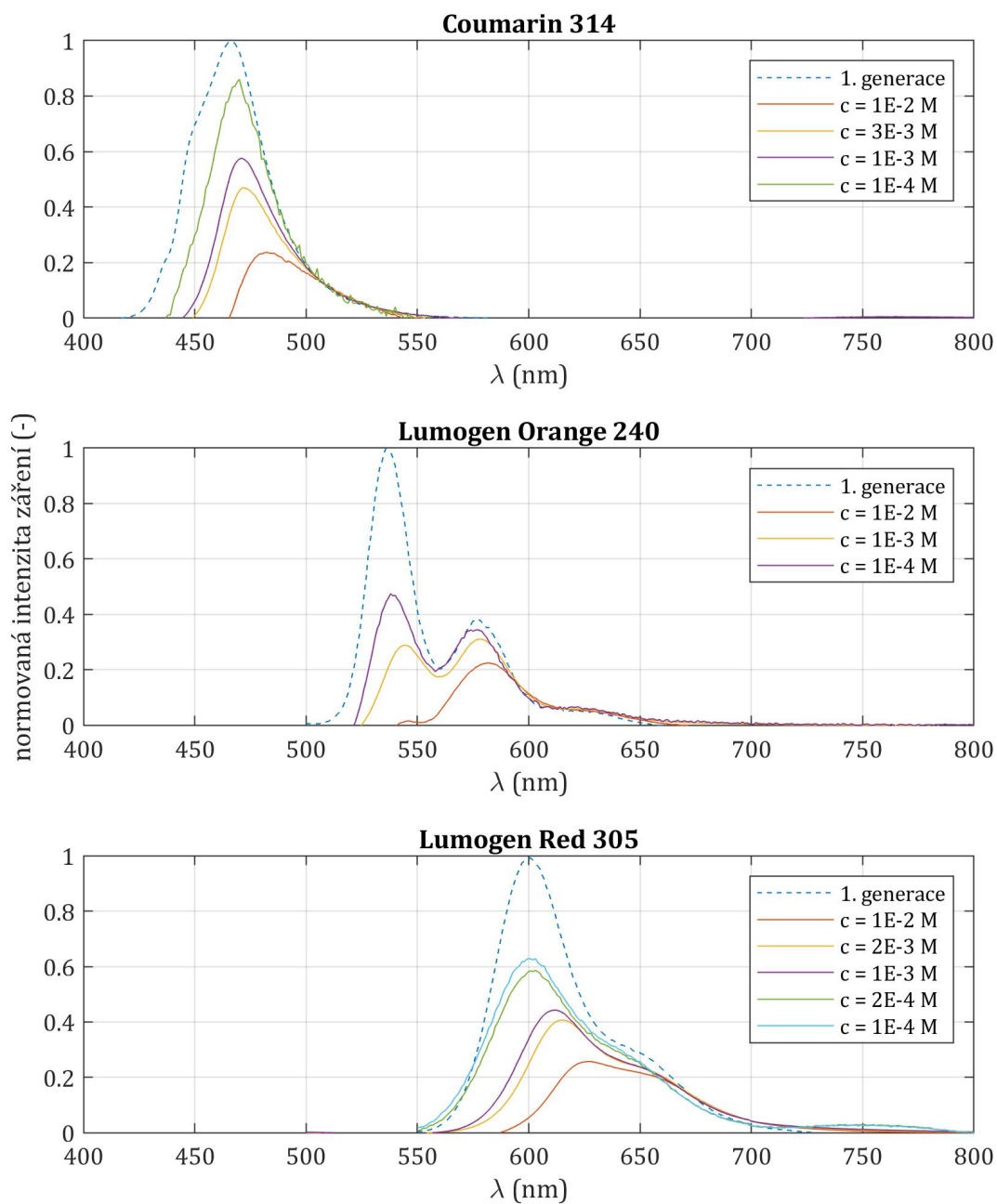
$\phi_0$	■ Vstupující zářivý tok (W)
$\rho_T$	■ Hustota toluenu (867 g l <sup>-1</sup> )
$\tau$	■ Transmittance (-)
$\theta_C$	■ Kritický úhel (°)
$\phi_f$	■ Kvantový výtěžek (-)
$\varepsilon$	■ Molární absorpční koeficient (M <sup>-1</sup> cm <sup>-1</sup> )
$\rho$	■ Reflektance (-)
$v$	■ Rychlost šíření světla v látkovém prostředí (m s <sup>-1</sup> )
$V$	■ Objem (ml)
$C_1$	■ Parametr aproximační funkce pro účinnost absorpce (-)
$K_1$	■ Parametr aproximační funkce pro účinnost absorpce (-)
$K_2$	■ Parametr aproximační funkce pro účinnost absorpce (M <sup>-1</sup> )
a-Si	■ Amorfni křemík
AM1.5	■ Referenční solární spektrum
c-Si	■ Krystalický křemík
CIGS	■ Fotovoltaický tenkovrstvý modul na bázi mědi, india, gallia a selenu
ČR	■ Česká republika
DSSC	■ Barvivem senzitivovaný solární článek
LSC	■ Luminiscenční solární koncentrátor
mono-Si	■ Fotovoltaický modul s monokrystalickým křemíkem
multi-Si	■ Fotovoltaický modul s multikrystalickým křemíkem
PMMA	■ Polymethylmethakrylát
PV	■ Fotovoltaický
QDC	■ Solární koncentrátor s Quantum Dots

## Příloha B

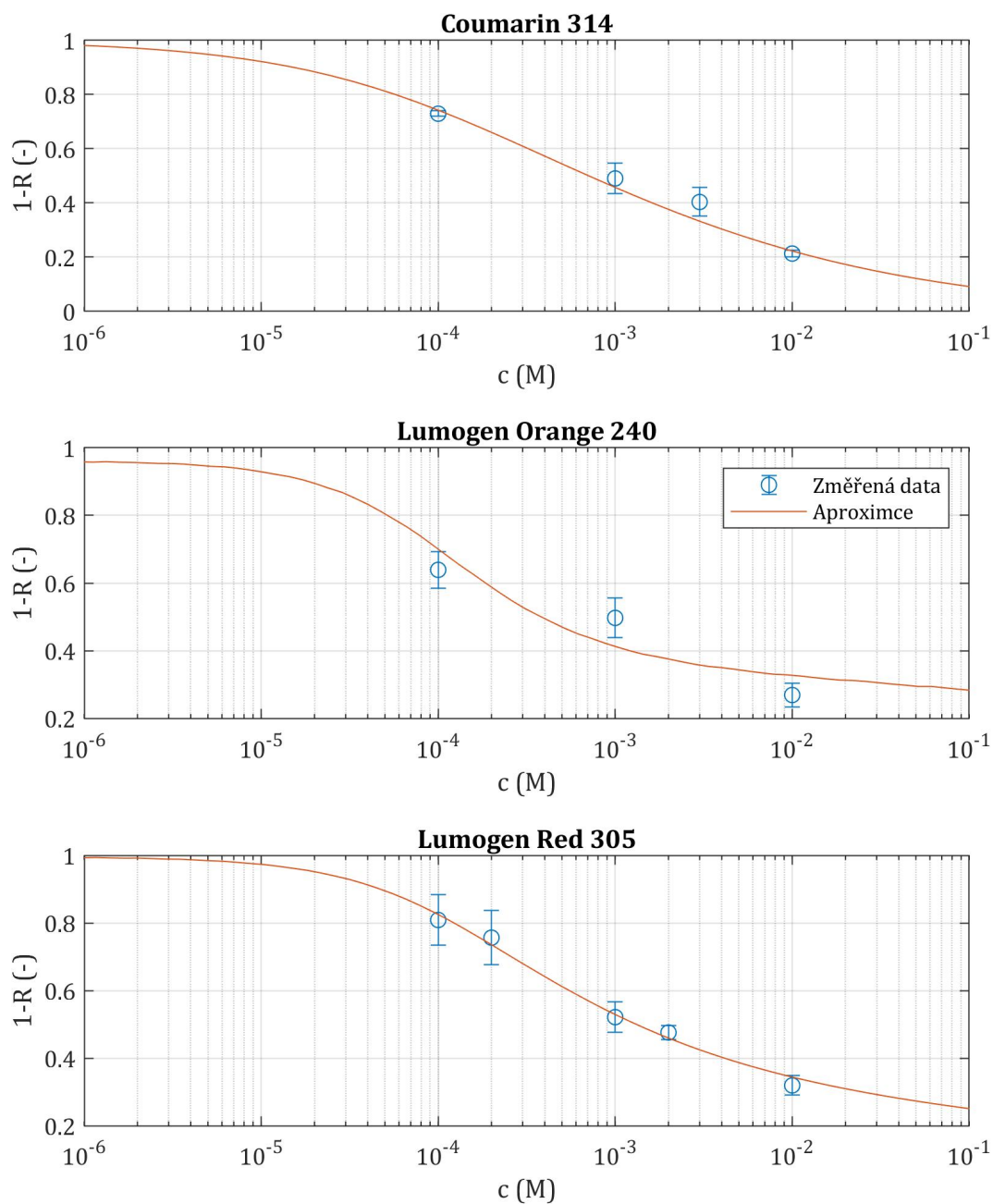
### Doplňující grafy



**Obrázek B.1.** Absorbance jednotlivých vzorků LSC s různou koncentrací barviva  $c$  (odshora barviva: Coumarin 314, Lumogen Orange 240, Lumogen Red 305). Svislá osa – normovaná intenzita záření (-), vodorovná osa – vlnová délka (nm).



**Obrázek B.2.** Emisní spektra vzorků LSC s různou koncentrací barviva  $c$  při osvětlování bílým světlem (odshora barviva: Coumarin 314, Lumogen Orange 240, Lumogen Red 305). Spektra okrajové fluorescence jsou normována tak, aby splývala se spektrem 1. generace daného barviva (přerušovanou čarou). Svislá osa – normovaná intenzita záření (-), vodorovná osa – vlnová délka (nm).



**Obrázek B.3.** Aproximace změřených hodnot pravděpodobnosti reabsorpce modelem pro všechny vzorky s použitými třemi fluorescenčními barvivy rozdělené do jednotlivých grafů (odshora barviva: Coumarin 314, Lumogen Orange 240, Lumogen Red 305). Odhadované absolutní odchylky změřených hodnot jsou znázorněny pomocí chybových úseček (modře – změřené hodnoty, oranžově – aproximace modelem). Svislá osa – pravděpodobnost reabsorpce ve tvaru  $1 - R$  (-), vodorovná osa – koncentrace barviva (M).

## **Příloha C**

### **Seznam přiložených souborů**

- MATLAB kód pro aproximaci pravděpodobnosti reabsorpce, účinnosti kolekce, účinnosti absorpce a optické účinnosti spolu se souvisejícími grafy