

# Spektrální vlastnosti světelných zdrojů a výhody pro obrazový a neobrazový systém

ČSO Brno, doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D., ing. Radim Václavíček  
Dny J. Lindy, Plzeň 2024

**Abstrakt:** Zásadní změny v poznatcích o fotoperiodickém řízení organismů až na buněčné úrovni a převratný nástup LED technologie do světelné techniky začátkem 21. století přivedly vědeckou komunitu k úvahám o novém pohledu na účinky a přínos umělého světla.

Se změnou společenského kontextu v pozornosti k přirozenému životnímu prostředí a technologickým vývojem v optimalizaci světelných zdrojů dochází i na revizi přístupu k tomu, jak pohlížet na kvalifikaci a instalaci zdrojů světla do veřejného prostoru a jak čelit problémům s rušivým světlem a fenoménem „světelného znečištění“.

## Barva, spektrum a chromatičnost

V mnoha článcích a návodech pro “správné” svícení či omezování světelného znečištění lze dnes najít vyjádření o “barvě světla”. Bohužel se povětšinou jedná o velmi laické vyjádření zatížené značnými nedokonalostmi a dominantně vzniká po léta vytvářený dojem, že tu “správnou” barvu zajistíme pohodlně jediným číslem tzv. “teplotou chromatičnosti” v Kelvinech. Navíc se nezdá, že objevuje i kontroverzní tvrzení, že právě tato hodnota určuje obsah “modré složky”. K vysvětlení proč je to celé často úplně jinak je potřeba víc než několik řádků.

Barva jako zrakový vjem člověka spadá do oblasti obrazového vnímání světla a tedy nám z principu nemůže příliš pomoci v moderním zkoumání těch “neobrazových” účinků světla přijímaného okem. Logicky také nelze jednoduše přenášet hodnoty z “lidské” kolorimetrie na vliv světla u rostlin a dalších druhů.

Navíc jednoduchá hodnota náhradní teploty chromatičnosti (CCT) vyjadřuje jen přibližně odstín vnímaného světla a u moderních zdrojů LED či zářivek nemá žádnou fyzikální či technickou vazbu na spektrální charakter světelného záření, což je naprosto zásadní okolnost!

Údaj o “teplotě” světla v Kelvinech (CCT) uvedený na maloobchodním obalu LED-žárovky je užitečný pro základní orientaci při nákupu osvětlení do domácností a dalších interiérů, ale rozhodně to není spolehlivý parametr pro vážnější projekty v oblasti osvětlování, zejména ve veřejném prostoru či při ochraně nočního prostředí nebo dokonce výzkumu - pro takové případy jsou přednostně určeny zdroje světla s podrobnou dokumentací výrobce, kde se dnes standardně uvádí spektrální charakteristika SPD, bez níž nelze vlivy světla na životní prostředí vyhodnotit.

S ohledem na aktuální potřebu kvantifikovat účinky světla na ekosystém a neobrazové vnímání člověka jsou v posledních letech vyvíjeny a testovány zcela nové metriky odvozené z výzkumu v tomto století a ty se zaměřují hlavně na zohlednění vlivu krátkých vlnových délek viditelného záření, neboli modré složky (z anglického *Blue content*).

### Spektrální charakteristika (SPD)

Ve výčtu parametrů kvality světla je určitě dobré alespoň stručně uvést spektrální charakteristiku (odborně SPD), která vyjadřuje poměrné zastoupení zářivé energie na jednotlivých vlnových délkách a je základem pro všechny obvyklé veličiny uváděné u světelných zdrojů a ve světelných úlohách (candela, lumen, lux, CCT, CRI, CFI, U500, DERMel, ...). Stručně řečeno, pokud máme k dispozici zářivou energii světla s rozložením ve viditelném spektru, tak můžeme vyjádřit i ty ostatní hodnoty, ale naopak to možné není!

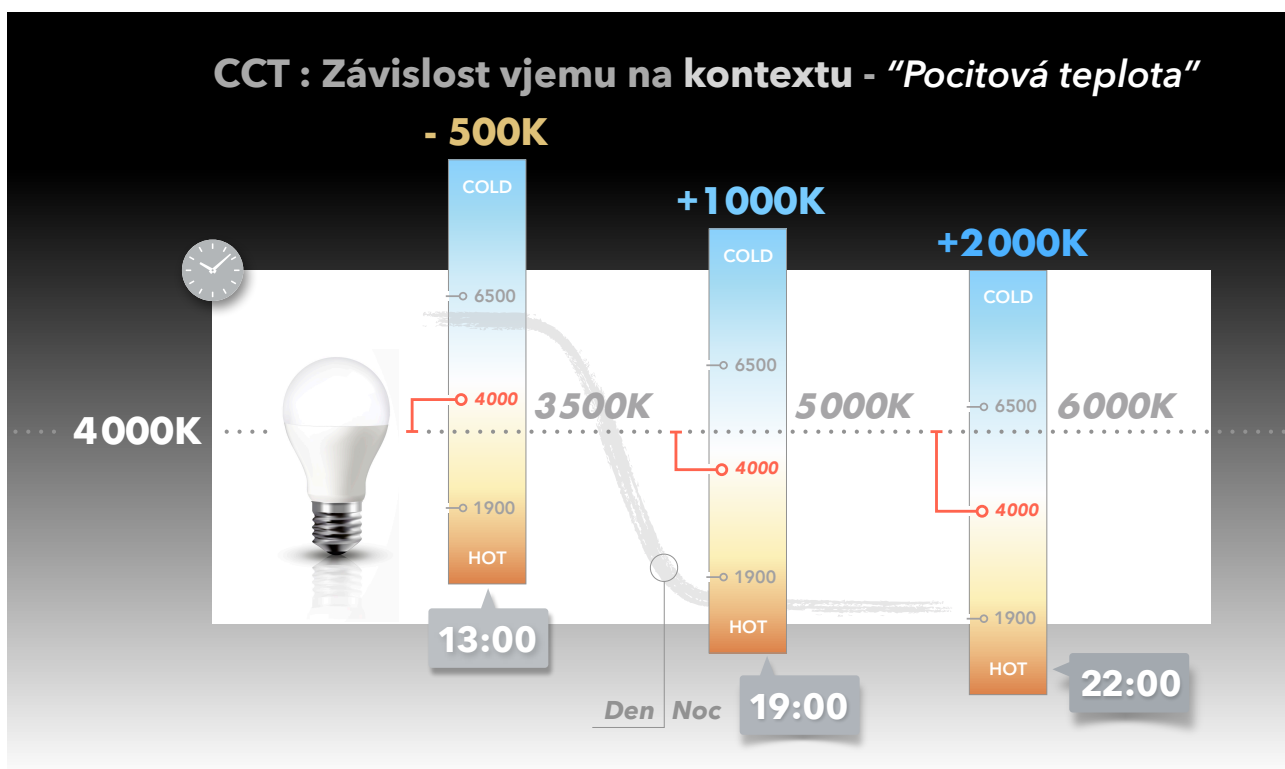
V současných technických normách, projektech a softwarových simulacích osvětlovacích soustav se dosud pracuje jen s jednotkami fotometrické intenzity a nikoli se spektrální informací, ale na odborných konferencích se již v posledních letech objevují názory, že to bude do budoucna zapotřebí změnit, pokud se má lidstvo posunout ke kvalitativně účinnějším řešením zejména u hodnotné náhrady denního světla v interiérech a optimalizaci ochrany nočního prostředí.

Konkrétním příkladem nastupujících změn v přístupu hodnocení světla z pohledu neobrazového vnímání lidským zrakem je již několik let respektovaná metrika pro ipRGC buňky popsána dokumentem CIE S 026:2018 [02], který vznikl na základě výzkumu Roberta Lucase a kol. [04], [05].

## Chromatická teplota a CCT

Jak do toho všeho tedy zapadají ta obvyklá doporučení uváděná v Kelvinech? Původní metrika “barevné teploty” je spjata s teorií absolutně černého tělesa z 19. století a funguje výborně pro zdroje světla využívající princip zahřívání hmoty na vysokou teplotu (tzv. “Incandescent”) jako jsou hořící plamen, Slunce či žhavé vlákno klasické žárovky. V případě této teorie vázané na teplotu pak stačí pouze jedno číslo abychom znali dostatečně přesné souřadnice barvy světla díky “předurčené” pozici na křivce teplotních zářičů.

U modernějších “studených” zdrojů umělého světla se ale využívají zcela jiné principy k dosažení viditelného záření a proto u nich nelze pro vyjádření barvy světla využít souvislost s fyzikální teplotou samotného zdroje (např. fluorescenční zářivky a LED). To bylo vědcům jasné už v počátcích vývoje výbojek a pro zachování kontinuity v klasifikaci a značení umělých zdrojů světla navrhli metodiku “náhradní teploty chromatičnosti” (CCT - Correlated Colour Temperature). Ta je založena na “nejbližším” referenčním zdroji se známou barevnou teplotou, jejíž hodnota je přiřazena zkoumanému světlu v podobě CCT. Taková hodnota nám pak objektivně říká pouze to, jaký referenční zdroj byl našemu vzorku nejbližší v chromatickém diagramu (CIE UCS 1960), ale nevíme jak to bylo daleko, ani v jakém směru, ani žádné další informace o spektrálním charakteru zkoumaného světla.



**Obr. 1** Subjektivní vjem “teplého” či “studeného” tónu zdroje bílého světla významně souvisí s okolním prostředím a fází cirkadiánního rytmu, ve které se pozorovatel nachází. V běžných podmínkách se u člověka spektrální citlivost na krátké vlnové délky směrem do noci zvyšuje a proto také dochází ke změnám ve vnímání neutrality bílého světla.

Narozdíl od té původní metriky barevné teploty nám jedno číslo u CCT nemůže určit konkrétní zbarvení světla, ale vyjadřuje jakousi množinu barev, které leží v chromatickém diagramu UCS na přísmce kolmé ke křivce teplotních zářičů a zároveň procházející bodem referenčního zdroje. Pro nejběžnější hodnoty CCT je to typicky 10 - 20 barev, které člověk rozliší u jedné hodnoty CCT (např. 4000 K).

Metodika CCT byla navržena přednostně pro klasifikaci umělých zdrojů bílého světla, takže pokud zůžeme použití na širokopásmové zářiče v rozsahu obvyklém pro denní světlo (~2700 – 15000 K), se souřadnicemi blízko křivky teplotních zářičů, tak je CCT i praktickým nástrojem pro rychlou orientaci v zbarvení.

Z výše uvedeného by mělo jasně vyplývat, že parametr náhradní teploty chromatičnosti (CCT) rozhodně není univerzální metrikou pro určování barvy světla a sám o sobě má význam pouze “doplňkové informace”.

Koncept CCT rozhodně nebyl zamýšlen jako obecný systém pro určování barev. I přesto, že je technicky možné u některých pestrých barev hodnotu v Kelvinech také vyčíslit, nelze to doporučit pro praktické využití.

Pro doplnění je možné uvést několik příkladů, co k parametru CCT říkají respektované dokumenty:

### CCT - příklad 1.

#### Revision of the EU Green Public Procurement Criteria

##### for Road Lighting and traffic signals (2019) /JRC Science for policy Report/

When specifying a maximum limit for CCT, it is important to know the availability of products on the market that can meet that requirement. An analysis of the luminaires that were added to the LightingFacts database in 2016 or 2017 as a function of CCT is provided below.

Some **general recommendations** can be made regarding this topic:

Do not use the term **blue light** in any GPP criteria unless **relating to spectral** emission within a defined wavelength range.

**Only use CCT if the criterion is related to aesthetic requirements relating to light perceived by humans** (rather than light perceived by other species).

If limiting blue light content is an issue, then specific metrics (such as the G-Index or alike) should be used to set thresholds. **CCT is a fuzzy and unsatisfactory metric of the blue content of light sources.**

Potential impacts on wildlife and skyglow are sufficient justifications to set restrictions on blue light. This would also have the benefit of addressing concerns with potential effects on human health (a complex matter in which a lot of research is being carried out) because these **concerns tend to increase with higher blue light content.**

zdroj: <<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC115406>>

### CCT - příklad 2.

#### CIE 234:2019 - A Guide to Urban Lighting Masterplanning

##### 6.2.5 Colour contrast of light

“It has never been technically easier or relatively cheap, to introduce saturated colour, either on a static or dynamic basis, than it is today. LED technology makes it possible today to work not only with saturated colours but with all shades of colours. This very ease of use implies a need for caution. **Note that for this type of application, CCT is not relevant** and the colour of the light source shall be expressed by chromaticity coordinates, mainly those of the CIE 1931 standard colorimetric system (x, y).”

### CCT - příklad 3.

#### Correlated color temperature is not a suitable proxy for the biological potency of light, 2022

##### Conclusion

“...potřebujeme přesnou a prediktivní metriku biologického potenciálu světla, která je založena na solidních vědeckých poznatcích. V této studii jsme tvrdili, že CCT je pro tento účel koncepčně nevhodná, a provedli jsme numerickou analýzu, která prokázala, že významná variace v cirkadiánním stimulu a melanopickém ekvivalentu denního osvětlení nastává při jakémkoli pevném CCT a fotopickém osvětlení, což činí z CCT nevhodný ukazatel pro takovou kvantifikaci. Použití CCT jako měřítka biologických účinků světla nelze obhájit.”

zdroj: <<https://www.nature.com/articles/s41598-022-21755-7>>

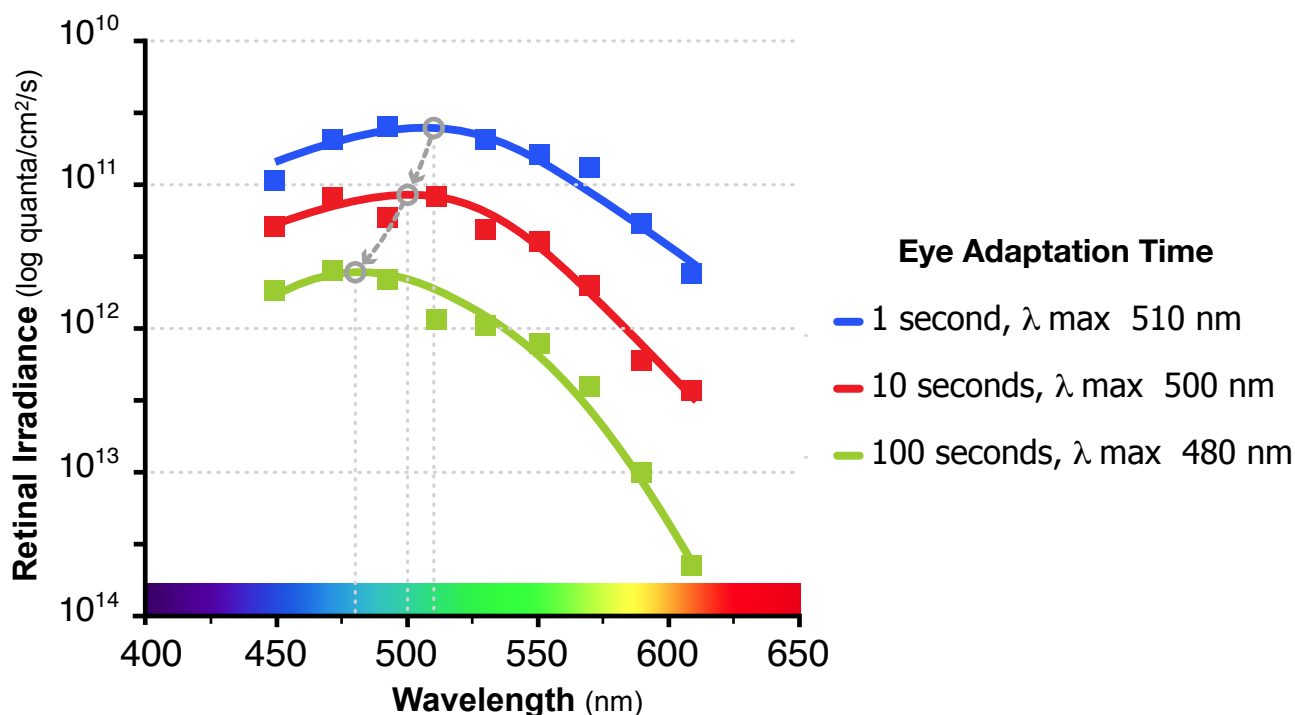
### Modrá složka

Když je řeč o “barevné teplotě” bílého světla, tak je vhodné zmínit návaznost na podíl krátkých vlnových délek, které vnímáme jako odstíny azurové, modré a fialové a jejich účinek vytváří pro většinu známých organismů v neobrazové rovině (NIF, non-image forming) signál o tom, že skončila noc a je den. V odborné literatuře můžeme potkat technické označení pro zmíněnou energii prostřednictvím výrazu “U500”, což je zkratka z anglického “under 500 nm”.

Mnoho vědeckých prací v oblasti přírodních věd spoléhá díky své technické neobornosti právě na velmi naivní předpoklad, že náhradní teplota chromatičnosti vyjadřuje podíl “modré složky” s přímou úměrou. To je způsobeno zejména návykem používat tento parametr v denním režimu u přirozeného bílého světla (teplotní zdroje širokopásmového záření ~2700–15000 K), kde tento předpoklad celkem dobře vyhovuje.

U umělých zdrojů jako jsou zářivky či LED už se dávkuje jednotlivé podíly zářivé energie poměrně nezávisle, takže není možné z výsledné hodnoty CCT v Kelvinech určit, jaké podíly vlnových délek jsou ve světle obsaženy - například pro 3000 K může modrá složka U500 nabývat bez problému hodnot od nuly do 35 %.

Jak pro záležitosti světelné hygieny tak i v otázkách rušení světlem hrajou významnou roli rozdíly v působení světla různých vlnových délek, které v praxi vnímáme jako různě zabarvené světlo. Jedním ze zásadních adaptačních mechanismů našeho oka je "pupilární reflex", který má významnou spektrální závislost a proto velmi záleží na spektrálním charakteru světla, kolik se nám ho dostane do oka, jak dobře uvidíme a jaké signály dostane náš nervový a hormonální systém [01]. Graf na obr. 2 dokládá, že oko reaguje na "modrozelené" složky bílého či barevného světla mnohem výraznějším zavřením pupily než na oranžové či červené světlo.



**Obr. 2** Spektrální závislost pupilárního reflexu lidského oka vykazuje nelineární průběh a dokumentuje řádově odlišnou reakci na modré světlo (450-500 nm) oproti oranžovému světlu např. ze sodíkových výbojek (~ 590 nm). Reakční citlivost se snižuje s dobou expozice a posouvá se ke kratším vlnovým délkám. /zdroj: CIE TN 003:2015 [01]/

## Literatura / Zdroje:

- [01] CIE TN 003:2015 - First International Workshop on Circadian and Neurophysiological Photometry 2013
- [02] CIE S 026/E:2018 - System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light
- [03] CIE 015:2018 - Colorimetry (4th edition)
- [04] Human melanopsin forms a pigment maximally sensitive to blue light ( $\lambda_{max}$  479 nm) supporting activation of signalling cascades, R. J. Lucas, H. J. Bailes, 2013
- [05] Measuring and using light in the melanopsin age, R. J. Lucas et al., 2014
- [06] Photoreceptor inputs to pupil control, M. Spitschan, Journal of Vision, 8.2019
- [07] Recommendations for daytime, evening, and nighttime indoor light exposure to best support physiology, sleep, and wakefulness in healthy adults, T. M. Brown et al., 2022
- [08] Health considerations of artificial indoor lighting, S. Temple, United Kingdom, 2023
- [09] CCT is not a suitable proxy for the biological potency of light, T. Esposito, K. Houser, Nature 11.2022