



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**  
Villamosmérnöki és Informatikai Kar  
Elektronikus Eszközök Tanszék

Lipák Gyula

**LED-EK SEGÍTSÉGÉVEL  
ELŐÁLLÍTOTT FEHÉR FÉNY  
HŐMÉRSÉKLETFÜGGÉSÉNEK  
VIZSGÁLATA**

KONZULENS

Dr. Hegedüs János  
Dr. Hantos Gusztáv

BUDAPEST, 2022

# Tartalomjegyzék

<b>Összefoglaló .....</b>	<b>3</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>5</b>
<b>Fontosabb szimbólumok és fogalmak jegyzéke.....</b>	<b>7</b>
<b>1 Háttér áttekintése.....</b>	<b>9</b>
1.1 A fehér fény .....	9
1.2 Fehér fény előállítása LED-ekkel .....	10
1.2.1 Fehér fény előállítása fényporok segítségével .....	11
1.2.2 Fehér fény előállítása színkeveréssel .....	12
<b>2 LED-ek spektrális teljesítményeloszlásának áram- és hőmérsékletfüggése.....</b>	<b>15</b>
2.1 Teljesítmény LED-ek multi-domain mérése.....	15
2.2 Mérési összeállítás .....	16
2.2.1 A T3Ster és TeraLED műszeregyüttes .....	16
2.2.2 Integráló (fotométer) gömb.....	17
2.2.3 Spektrális mérések .....	17
<b>3 Monokromatikus LED-ek spektrumának modellezése .....</b>	<b>19</b>
<b>4 Saját mérési és modellezési eredmények .....</b>	<b>23</b>
4.1 Modellezés harmadfokú polinom segítségével .....	24
4.2 A harmadfokú polinomiális modell implementálása .....	25
4.3 További modellek implementálása .....	29
<b>5 Összegzés, kitekintés, hasznosulás.....</b>	<b>33</b>
<b>6 Köszönetnyilvánítás .....</b>	<b>36</b>
<b>Irodalomjegyzék.....</b>	<b>37</b>
<b>Függelék.....</b>	<b>41</b>

## Összefoglaló

Fehér fény LED-ekkel történő előállításához jelenleg leggyakrabban kék, vagy UV LED-eket és ún. hullámhossz-konvertáló fényporokat alkalmaznak. A gerjesztő LED fényét a fénypor részben átereszti (ez az ún. „kék csúcs”), részben pedig elnyeli, az elnyelt rövidebb hullámhosszú fotonokat pedig magasabb hullámhosszon bocsátja ki (ez az ún. „sárga csúcs”). A LED közvetlen, és a fénypor másodlagos kibocsátásával együtt hozza létre a fehér fényt. Jelenleg a fénypor alapú LED-ek jelentik a legegyszerűbb, leghatékonyabb és legolcsóbb megoldást a világítástechnika ipar számára. A hatásfok növelésének azonban elvi felső határa van, amelyet a hullámhossz-konverzió energiavesztesége, az ún. Stokes eltolás határoz meg.

A fehér fény előállításának másik módja a színkeverésen alapul, amelynek során két, vagy több színből állítanak elő fehér fényt. Az elfogadható eredmény érdekében a színkeveréses rendszerek két szín (ún. dikromatikus elrendezések) helyett általában a három elsődleges színt (ún. trikromatikus elrendezések) használják. Piros, zöld és kék (angolul „*Red, Green, Blue*” – rövidítve „*RGB*”) LED-ek felhasználásával közel bármilyen színt elő tudunk állítani. A jobb színvisszaadás érdekében további, gyakran sárga LED-eket is felhasználhatnak (ún. tetrakromatikus elrendezések). Az ilyen elrendezésekben nincs jelen hullámhossz-konverzió, így az elérhető hatásfokot az alkalmazott LED-ek különböző kvantum hatásfokai szabják meg, ennek azonban nincs elvi felső határa, ideális esetben elérheti akár a 100%-ot is.

Az elektromos energiát felhasználó fényforrások esetében a hatásfok értéke a fény formájában kisugárzott teljesítmény és a betáplált elektromos teljesítmény hányadosaként számítható ki. A kisugárzott teljesítményből az emberi szem számára is látható mennyiség, azaz a fényáram az ún.  $V(\lambda)$  szemérzékenységi függvény segítségével határozható meg, a fényforrás spektrális teljesítményeloszlását a  $V(\lambda)$  függvénnyel súlyozva és integrálva. A lumenben kifejezett fényáram és a betáplált elektromos teljesítmény hányadosa az ún. fényhasznosítás, amelynek elvi maximuma 683 lm/W, egy 555 nm hullámhosszon sugárzó monokróm fényforrás esetében. Az ennél rövidebb, vagy hosszabb hullámhosszon sugárzó fényforrások fényhasznosítása ennél az értéknél csak kevesebb lehet.

A fényporokon alapuló fehér LED-ek fényhasznosítása erősen függ a hullámhossz-konverzió után kialakuló spektrális teljesítményeloszlástól, értékének elvi maximuma a 200...280 lm/W tartományba tehető. Trikromatikus elrendezések esetében ez a tartomány 240...340 lm/W körüli, míg dikromatikus fényforrások esetén meghaladhatja akár a 400 lm/W értéket is. Nyilvánvaló tehát a dikromatikus LED-es fehér fényforrásokban rejlő és a hatásfok folyamatos növekedésével egyre inkább kecsegtető potenciál.

A fénykeveréses módszer azonban több problémát is magában hordoz. Ezen problémák egyikét a különböző színű LED-ek fényáramának eltérő hőmérsékletfüggése jelenti. Az előállított fehér fény „minősége” a hőmérséklet megváltozásával elfogadhatatlan mértékben romolhat.

Dolgozatomban a monokromatikus LED-ek spektrális teljesítményeloszlásának modellezési lehetőségeit tárgyalom. A szakirodalomban fellelhető egyes modelleket a saját mérési eredményeimre implementálom és bemutatom a paraméter identifikáció után számolt illesztési hibákat a különböző színű LED-ek esetén. A modellillesztéseket különböző nyitóáramok és lapkahőmérsékletek esetén is elvégzem, amelynek segítségével később vizsgálható lesz a LED-ek hőmérsékletfüggő viselkedése.

Munkám későbbi célja egy olyan működtetési séma kialakítása lesz, amelynek segítségével a hőmérsékletfüggő viselkedés részben kompenzálható, vagy akár teljes egészében ki is küszöbölhető. Dolgozatom e későbbi munka előkészítésére szolgál.

## Abstract

In order to produce white light with LEDs, most often blue or UV LEDs and so-called wavelength-converting phosphors are used. The light from the excitation LED is partially transmitted by the phosphor material (this is the so-called "blue peak" or "die peak") and partially absorbed, and the absorbed shorter wavelength photons are emitted at longer wavelengths (this is the so-called "yellow peak" or "phosphor peak"), together forming white light. Currently, phosphor-based LEDs are the simplest, most efficient, and cheapest solution for the lighting industry. However, there is a theoretical upper limit of the efficiency, determined by the energy loss of the wavelength conversion, called the Stokes-shift.

Another way of producing white light is based on colour mixing, during which white light is produced from two or more colours. In order to obtain acceptable results, colour mixing systems usually use three primary colours (so-called trichromatic arrangements) instead of two colours (so-called dichromatic arrangements). We can produce almost any colour by using red, green, and blue LEDs. For better colour reproduction, additional (yellow, the most often) LEDs can also be used (so-called tetrachromatic arrangements). In such light sources, there is no wavelength conversion, so the achievable efficiency is determined by the different quantum efficiencies of the LEDs, but there is no theoretical upper limit, ideally it can even reach 100%.

In the case of light sources that use electrical energy, the value of the efficiency can be calculated as the ratio of the power emitted in the form of light (i.e. the radiant flux) and the electrical power supplied. The amount of light visible to the human eye, i.e. the luminous flux, can be determined by integrating the spectral power distribution of the light source weighted with the  $V(\lambda)$  eye sensitivity function. The quotient of the luminous flux expressed in lumens and the supplied electrical power is the so-called efficacy, the theoretical maximum of which is 683 lm/W, in the case of a monochromatic light source emitting at a wavelength of 555 nm. Efficacy of light sources emitting shorter or longer wavelengths can only be less than this value.

Efficacy of white LEDs based on light converting phosphors strongly depends on the spectral power distribution, the theoretical maximum of its value can be placed in the range of the 200...280 lm/W. In the case of trichromatic arrangements, this range is

around 240...340 lm/W, while in the case of dichromatic light sources it can even exceed 400 lm/W. The potential in dichromatic LED white light sources, which is becoming more and more promising with the continuous increase in efficiency, is therefore obvious.

However, the light mixing method has several issues. One of these is the different temperature dependence of the luminous flux of the different coloured LEDs. The "quality" of the white light produced can deteriorate to an unacceptable extent with changes in temperature.

In this document, I discuss the modelling possibilities of the spectral power distribution of monochromatic LEDs. I implement some of the models found in the literature on my own measurement results and present the fitting errors calculated after parameter identification in the case of LEDs of different colours. I also perform the fitting of the models for different forward currents and chip temperatures, with the help of which the temperature-dependent behaviour of the LEDs can be examined later. The future goal of my work will be to develop an operating scheme, with the help of which the temperature-dependent behaviour can be partially compensated or even completely eliminated. The present document serves as a preparation for this later work.

## Fontosabb szimbólumok és fogalmak jegyzéke

$\Phi_e$	(teljes) radiometriai fluxus (teljes kisugárzott optikai teljesítmény), $\Phi_e = P_{opt}$ , [W]
$\Phi_V$	(teljes) fényáram, [lm]
$\lambda_p$	csúcs hullámhossz, [nm]
$\lambda$	hullámhossz, [nm]
$\eta_e$	energiakonverziós hatásfok, $\eta_e = P_{opt}/P_{el}$ , [-] vagy [%]
$\omega$	frekvencia, körfrekvencia, [Hz], [rad/s]
$c$	a fény sebessége vákuumban (299 792 458 m/s)
$h$	Planck állandó ( $6.626070 \cdot 10^{-34}$ Js)
$I_F$	egy pn-átmenet (LED) teljes nyitóárama, [A]
$I_H$	termikus tranziens mérés során alkalmazott fűtőáram, [A]
$I_M$	termikus tranziens mérés során alkalmazott mérőáram, [A]
$k_B$	Boltzmann állandó ( $1.380649 \cdot 10^{-23}$ J/K)
$P_{el}$	egy LED-be betáplált teljes elektromos teljesítmény, $P_{el} = I_F \cdot V_F$ [W]
$P_{opt}$	teljes kisugárzott optikai teljesítmény (vagy: teljes radiometriai fluxus), $P_{opt} = \Phi_e$ , [W]
$P_H$	egy LED teljes fűtőteliessége, [W]
$T$	hőmérséklet, [°C]; ill. abszolút hőmérséklet, [K]
$T_A$	környezeti hőmérséklet / termikus referencia pont (a "termikus föld") hőmérséklete, [°C] vagy [K]
$T_J$	pn-átmenet hőmérséklete, [°C] vagy [K]
$T_{ref}$	referencia hőmérséklet (önkéntesen választott), [°C] vagy [K]
$V_F$	egy pn-átmenet (LED) kapcsain mérhető teljes nyitófeszültség, [V]
$V_g$	tiltott sáv szélesség potenciálban kifejezve, $V_g = W_g/q$ [V]
$V_T$	termikus feszültség, $V_T = k \cdot T/q$ [V] ( $\approx 26$ mV 300 K-en)
$Z_{th}$	termikus impedancia (saját impedancia, transzfer impedancia), [K/W]
$Z_{th}(t)$	termikus impedancia függvény (időtartománybeli), [K/W]
A	modellezési paraméter amplitúdó, angol terminológiával "Amplitude"
C	modellezési paraméter középpont, angol terminológiával "Center" (legtöbb függvény esetében megegyezik a $\lambda_p$ -vel)
S	modellezési paraméter ferdeségi együttható, angol terminológiával "Skew"
W	modellezési paraméter szélesség, angol terminológiával "Width"

- Sugárzott teljes optikai teljesítmény („*total radiant flux*”, szokásos jele:  $\Phi_e$ ; illetve „*emitted optical power*”, szokásos jele:  $P_{opt}$ ;  $\Phi_e = P_{opt}$ ): a sugárzás formájában kibocsátott teljesítmény, wattban ( $W$ ) kifejezve.
- Energiakonverziós hatások („*radiant efficiency*”): a betáplált elektromos teljesítmény és a kisugárzott optikai teljesítmény hányadosa. Számítása:  $P_{opt}/P_{el}$ . Jele:  $\eta_e$
- Összfényáram („*total luminous flux*”): a teljes térszögbe kisugárzott teljesítmény emberi szem számára látható része, azaz a sugárzott teljesítmény a nappali (*fotopos*) látásra vonatkoztatott  $V(\lambda)$  CIE szemérzékenységi függvénnyel súlyozva, ahol  $\bar{y} = V(\lambda)$ . Jele:  $\Phi_V$ , SI mértékegysége: lumen ( $lm$ ).
- Fényhasznosítás („*luminous efficacy*”): a fényáram és a fényforrás által felvett elektromos teljesítmény aránya; jele:  $\eta_V$ , SI mértékegysége:  $lm/W$ .
- Szkotopos fényáram („*scotopic flux*”): a sugárzott teljesítmény *szkotopos* (éjszakai látásra vonatkoztatott) hatásfüggvénnyel (a szokásosan  $V'(\lambda)$  jelölésű függvénnyel) súlyozott értéke. Mértékegysége a (szkotopos) lumen ( $lm$ ).
- Színességi koordináták („*color coordinates*”; az ún. 1931 2°-os látóterű szabványos megfigyelőre vonatkozó színinger megfeleltető függvényekkel számolva és a CIE 1931 xy színességi diagramban ábrázolva).
- Színhőmérséklet („*color temperature*”): annak a feketetest-sugárzónak a  $K$ -ben kifejezett hőmérséklete, amelynek színérzete megegyezik a vizsgált fényforrás által okozottal.
- Korrelált színhőmérséklet (CCT, „*Correlated Color Temperature*”): a nem hőmérsékleti sugárzáson alapuló fényforrások színérzetének minősítésére használt mennyiség. Mértékegysége:  $K$ .
- Színvisszaadás („*colour rendering (of a light source)*”): a fényforrások egyik fontos jellemző tulajdonsága, amely azt mutatja meg, hogy az adott fényforrás fényével megvilágított színes felület színei mennyire helyesen jelennek meg. Helyesnek tekintjük az egyenlő energia eloszlású fényforrással megvilágított felület színeit, és a fekete test fényével megvilágított felület színeit (függetlenül a Napfény pillanatnyi színhőmérsékletétől). Definíció szerűen a színvisszaadás az adott fényforrás és egy tökéletes színvisszaadású referencia fényforrás által megvilágított azonos színes felület színingereinek összehasonlításával jellemezhető. A színíngerek képzésénél figyelembe kell venni a szem színadaptációját az adott fényforráshoz.
- Színvisszaadási index („*colour rendering index*”): Mérés szám annak jellemzésére, hogy egy vizsgált sugárzáseloszlással megvilágított tárgy színe hogyan egyezik meg ugyanazon tárgynak referencia sugárzáseloszlással történő megvilágításakor kapott színé-vel, figyelembe véve a kromatikus adaptációt.



# 1 Háttér áttekintése

A világítástechnika ipar rohamos fejlődése a fehér fény előállításának módját is megreformálta. A jelenleg leggyakrabban használt, hullámhossz-konverzió alapuló, fényporos fehér LED-ek hatásfoka azonban már elvében is korlátos [1], és elképzelhető, hogy a világítástechnika ipar már a közeljövőben megközelítheti ennek a technológiának az elméleti határát [2]. Ahhoz, hogy a fényforrások hatékonyságát tovább növeljük, más technológiai megoldásokat is meg kell vizsgálnunk. Az alábbiakban bemutatok egy lehetséges alternatívát, annak előnyeit, hátrányait, valamint a megértéséhez szükséges alapfogalmakat.

## 1.1 A fehér fény

A téma bővebb kifejtése előtt mindenképpen érdemes meghatározni, hogy pontosan mit is értünk „fehér” fény alatt, azonban ennek leírása korántsem annyira nyilvánvaló, mint amilyen gyakran ezt a kifejezést a mindennapokban használjuk. Jól jellemzi a pontos definíció nehézségét az a tény is, hogy erre vonatkozóan még a CIE, azaz a Nemzetközi Világítástechnikai Társaság (angolul: „*International Commission on Illumination*”; eredeti francia elnevezésén: „*Commission internationale de l'éclairage*”) Nemzetközi Világítástechnikai Szótárában [3] sem találunk közvetlen szócikket. A fogalommal kapcsolatban a Wikipédia internetes szabad hozzáférésű enciklopédia oldalán is eltérő megfogalmazásokat olvashatunk. „Fehér” elnevezéssel a Világítástechnikai Kislexikonban [4] sem találunk szócikket, közvetett módon azonban több helyen is megtaláljuk, például a „Semleges szín” kifejezés alatt:

### **„Semleges szín (akromatikus szín)**

*Achromatic colour; Neutralfarbe*

*Semleges színérzéklet, amelyet a minden hullámhosszúságon azonos energiával sugárzó sugárforrás hoz létre.*

*Ezt a fogalmat a **fehér**, ill. szürke árnyalatok megjelölésére is használják.*

*Meghatározott színek keveréke is eredményezhet semleges színérzetet adott spektrális összetételű megvilágító esetében.”*

A fentihez hasonló megfogalmazást olvashatunk a BME MOGI tanszékének Műszaki optika című jegyzetében [5] is:

„Az egyenlő energiájú spektrumú fény mindhárom receptort azonos mértékben ingerli, ezért az ilyen fényt az intenzitástól függően fehérnek, szürkének, vagy feketének látjuk.”

Továbbá, „Fehér fény az, amely a nappali természetes megvilágításból származik, és annak spektrumát semmilyen tényező nem befolyásolta” [6]. Hasonlóképp, fehér színérzetet ad a kb. 5500 K hőmérsékletűre hevített fekete test sugárzó, azonban nem minden fekete test sugárzó színe fehér és a természetes megvilágítás sem mindig fehér színérzetet kelt. Jó példa erre az izzásig hevített vasanyag színátmenete a lehülése közben, vagy a kékesebb színű forróbb, illetve a vörösebb színű hidegebb csillagok fénye. Ezekhez hasonlóan, más színérzetet kelt a déli napsütés és a lemenő Nap fénye is, de a természetes megvilágítást nagyban befolyásolják az éppen aktuális meteorológiai viszonyok is. Mindezt tovább „színesítik” az emberi szem színdiszkriminációs és adaptációs képességei [7].

A színhőmérséklet (vagyis annak a fekete testnek a hőmérséklete, amelynek sugárzása a vizsgált színínggerrel megegyező) a fentiek miatt nem lehet jó mérőszáma annak, hogy egy fényforrás mennyire „fehér”. Megoldás lehetne az ún. CIE 1931 szabványos színmérő rendszer [8], azonban sem az  $xy$ , sem az  $u',v'$  színterekben nem találunk egyértelműen meghatározott „fehér” területet.

A fehér fényforrások jellemzésének talán az egyik legalkalmasabb mérőszáma az ún. színvisszaadási index (angol terminológiában CRI, vagyis „*Colour rendering index*”), vagyis az, hogy az adott spektrális teljesítményeloszlású fényvel megvilágított tárgy színe milyen mértékben egyezik meg azzal a színnel, amely egy referencia fényforrás alatt látható. Másképp megfogalmazva, a színvisszaadási index egy fényforrás azon képességét méri, hogy a tárgyak színét mennyire hűen adja vissza egy ideális fényforráshoz képest. A színvisszaadási index meghatározása meglehetősen komplex, melyet a CIE 13.3-1995 Technikai Leírás [9] tartalmaz, de a metrika kiszámítására szinte valamennyi optikai laboratóriumban találunk megvalósított megoldást, akár a mérőrendszerek saját szoftvereinek támogatásaként, akár házon belül készített kalkulátorok formájában.

## 1.2 Fehér fény előállítása LED-ekkel

A LED-ek („*Light Emitting Diode*”, azaz fényemittáló, avagy fénykibocsátó dióda) szilárdtest világítástechnikai eszközök, amelyek működési elvükből adódóan

monokromatikus sugárzók [1], [10]. Ahhoz, hogy fehér fényt állítsunk elő, az szükséges, hogy a szemünkben lévő, három különböző típusú színérzékelő receptorsejtek megfelelő arányban legyenek stimulálva. Ebből adódóan fehér fényt akár eltérő spektrális teljesítményeloszlások segítségével is kaphatunk.

Ilyen spektrum előállítása monokromatikus LED-ekből alapulhat színkeverésen, vagy hullámhossz-konvertáló fényporok felhasználásán. A különböző megoldásokat egyebek között fényhasznosítás és színvisszaadás szempontjából értékelhetjük. Fényhasznosításnak a félvezető által kibocsájtott, lumenben mért fényáram és a felvett, wattban kifejezett elektromos teljesítmény hányadosát nevezzük. Fényáramnak nevezzük a sugárzott optikai teljesítmény emberi szem számára is látható részét, amelyet a spektrális teljesítményeloszlás  $V(\lambda)$  szemérzékenységi függvényvel történő súlyozásával kaphatunk meg.

### **1.2.1 Fehér fény előállítása fényporok segítségével**

Fehér fény LED-ekkel történő előállításához jelenleg leggyakrabban egy gerjesztő LED mellett különböző összetételű, ún. hullámhossz-konvertáló fényporokat alkalmaznak, amelyek részben vagy teljes mértékben elnyelik gerjesztő LED fényét, majd az elnyelt fotonokat rendszerint magasabb hullámhosszon sugározzák le újra. Ezek a megközelítések UV, vagy leggyakrabban kék gerjesztést alkalmaznak, a konverzió segítségével kialakított további csúcs hullámhosszak tekintetében pedig több megoldás is lehetséges. Megkülönböztethetünk dikromatikus, trikromatikus és tetrakromatikus elrendezéseket aszerint, hogy a gerjesztő kék vagy UV fény mellett hány különböző csúcs hullámhosszal rendelkező fényporanyagot használnak fel. [1]<sup>1</sup>

A LED közvetlen, és a fénypor másodlagos kibocsátása együtt hozza létre a fehér fényt. Jelenleg a fénypor alapú LED-ek jelentik a legegyszerűbb, leghatékonyabb és legolcsóbb megoldást a világítástechnika ipar számára.

---

<sup>1</sup> A gyakorlatban a különböző fénypor anyagok által létrehozott csúcs hullámhosszak azonban jellemzően nem jól elkülöníthetők, ezek spektrális teljesítményeloszlása általában „összemosódik”, amelyet egyszerűsítve csak „sárga csúcsként”, vagy „fénypor csúcsként” nevezünk meg.

### 1.2.1.1 Hullámhossz-konverzió alapuló fehér fényforrások hatékonysága

A fénypor egy hullámhossz-átalakító (angol terminológiával: „ $\lambda$ -converter”) anyag. Rövidebb hullámhosszról magasabb hullámhosszra történő átalakítás esetén a hullámhossz konvertáló anyag hatásfoka két különböző jellemzővel írható le: a konverzió külső kvantumhatásfoka ( $\eta_{ext}$ ), és a konverzió során fellépő kvantummechanikai energiaveszteség (ún. Stokes-eltolódás).

Az anyag külső kvantumhatékonyság ( $\eta_{ext}$ ) az alábbi képlettel adható meg:

$$\eta_{ext} = \frac{a \lambda - \text{konverter által emittált fotonok száma egy másodperc alatt}}{a \lambda - \text{konverter által elnyelt fotonok száma egy másodperc alatt}} \quad (1)$$

A külső kvantumhatásfok tehát az emittált és az elnyelt fotonok aránya. Ezek különbsége miatt energia többlet alakul ki az anyagban.

A hullámhossz-konvertáló anyagok kisebb energiájú fotonokat emittálnak az abszorbeált fotonoknál. Az így kialakuló energia különbséget jellemzően hőleadás útján, veszteségként adják le, fononok formájában<sup>2</sup>. Az emittált és az abszorbeált fotonok közötti energia különbséget nevezzük Stokes-eltolásnak:

$$\Delta E = hv_1 - hv_2 = \frac{hc}{\lambda_1} - \frac{hc}{\lambda_2} \quad (2)$$

ahol  $h$  a Planck állandó,  $\lambda_1$  és  $\lambda_2$  a foton eredeti, valamint konverzió utáni hullámhossza. A hullámhossz eltolódásból adódó hatásfok az alábbi képlettel fejezhető ki:

$$\eta_{\lambda\text{-konverzió}} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (3)$$

Ezeknek megfelelően a hullámhossz-konverter fénypor hatékonysága az alábbi módon fejezhető ki, a fentebb taglalt két komponens szorzataként:

$$\eta_{\lambda\text{-konverter}} = \eta_{\lambda\text{-konverzió}} \eta_{ext} \quad (4)$$

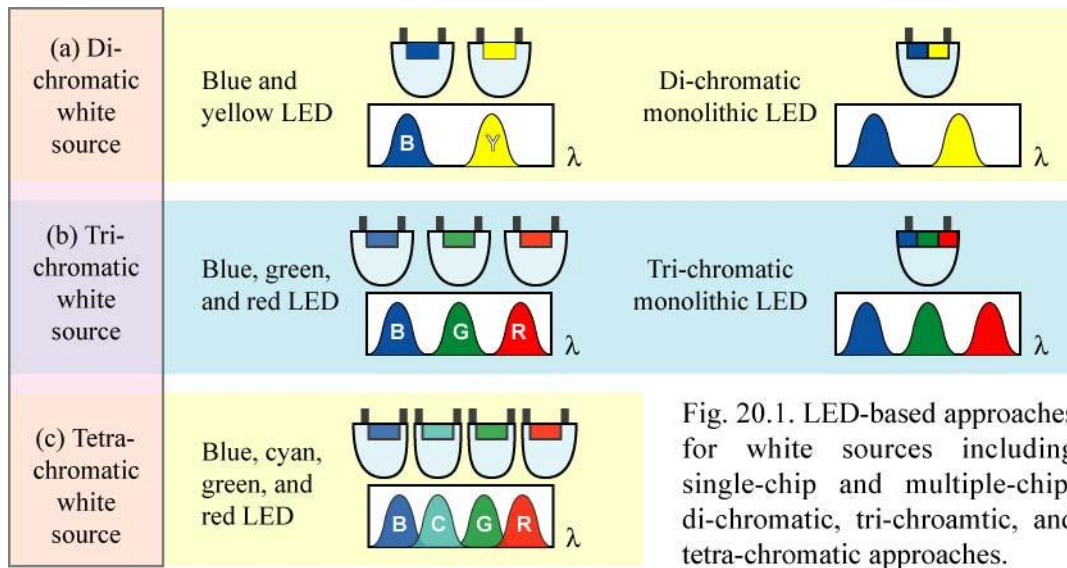
### 1.2.2 Fehér fény előállítása színkeveréssel

A fehér fény keltéséhez használhatunk ún. dikromatikus, trikromatikus és tetrakromatikus vagy akár ennél több színből álló elrendezéseket a fényporos

---

<sup>2</sup> Léteznek abszorbeált fotononként több foton is kibocsátó fénypor anyagok, ezek azonban csak kutatási anyagok részét képezik, a gyakorlatban nem terjedtek el. [1]

megoldásokhoz hasonlóan, itt azonban a hullámhossz csúcsokat elsődleges sugárzók hozzák létre. Ilyen elrendezésekre látunk példát az 1.1. ábrán.



**1.1. ábra.** Fehér fény előállításának különböző lehetőségei, monokromatikus LED-ek segítségével; a) dikromatikus, b) trikromatikus és c) tetrakromatikus elrendezések egyetlen (balra) vagy több (jobbra) LED lapkát tartalmazó tokok esetén. [1]

Dikromatikus színkeverésnél két komplementer szín használatával állíthatunk elő fehér fényt. A komplementer színek megfelelő megoszlásban olyan stimulációt váltanak ki, melyet fehér fényként érzékelünk. Ilyen fényforrások elméleti fényhasznosítása akár 440 lm/W is lehet. Nyilvánvaló tehát a dikromatikus LED-es fehér fényforrásokban rejlő és a hatásfok folyamatos növekedésével egyre inkább kecsegtető potenciál. [1]

Habár a dikromatikus fehér fény rendelkezik a legnagyobb elméleti hatásfoka, színvisszaadási indexe ennek a legalacsonyabb. Ezzel szemben trikromatikus fényforrások jelentősen jobb (akár 80-nál magasabb) színvisszaadási indexel is rendelkezhetnek és fényhasznosításuk is meghaladhatja a 300 lm/W-ot [1]. Ilyen trikromatikus RGB („Red, Green, Blue”) modulok vörös, zöld és kék LED-ekből épülnek fel, és ennek a három színnek a megfelelő kombinációjával – elvben – csaknem bármilyen színt elő tudnak állítani. Ezek a modulok jellemzően relatíve jó színvisszaadási indexel rendelkeznek és hatékonyságuk is megfelelően magas, így megfelelőek lehetnek általános célú fehér világításra is. Továbbá, ezekben az elrendezésekben nincs jelen hullámhossz-konverzió, így az elérhető hatásfokot az

alkalmazott LED-ek különböző kvantum hatásfokai szabják meg, ennek azonban nincs elvi felső határa, ideális esetben elérheti akár a 100%-ot is.

Még több színek komponenset tartalmazó fényforrások segítségével tovább növelhetjük a színvisszaadási indexet. Az ilyen típusú világítótestek a szélesebb hullámhossz választék miatt jobb lehetőséget kínálnak a fehér fény (korrelált) színhőmérsékletének változtatására is anélkül, hogy feláldoznánk a fényforrás színvisszaadási képességét. Viszont, általánosan az mondható el, hogy a színek komponensek növelése a gyakorlatban a hatásfok csökkenéséhez vezet.

LED-ek segítségével történő színkeveréses fehér fény előállítása további problémákat is felvet, mivel ezek spektrális teljesítményeloszlása nyitóáram- és hőmérsékletfüggő, vagyis az ilyen módon előállított fehér fény munkapontonként eltérő lehet. Célom ebben a tanulmányban az ilyen modulok viselkedésének leírására és egy ezt leíró modell elkészítésére.

## 2 LED-ek spektrális teljesítményeloszlásának áram- és hőmérsékletfüggése

A LED-ek spektrális teljesítményeloszlása erősen függ a működési hőmérséklettől és az őket meghajtó nyitóáramtól. A további fontos és gyakran használt mérőszámokat is a spektrális teljesítményeloszlás segítségével határozhatunk meg, mint például a sugárzott teljesítmény ( $\Phi_e$ ), a fényáram ( $\Phi_v$ ), a színvisszaadási index ( $R_a$ ) és a korrelált színhőmérséklet ( $CCT$ ) (angol terminológiában „*Correlated Color Temperature*”).

Amennyiben egy LED spektrumának pontos modellezése kritikus (például közvilágítási, vagy autóiipari alkalmazások esetén), úgy szükséges lehet a LED környezetfüggő viselkedésének pontos ismerete. Különösen igaz ez olyan komplex modulok esetén, mint például egy színkeverésen alapuló fehér fényforrás, ahol az egyes alkalmazott LED-ek környezetfüggő érzékenységei még eltérőek is. Ennek megállapítása ún. multi-domain feladat, vagyis egyszerre kell vizsgálni a LED elektromos, optikai és termikus működését. Az következő részekben bemutatásra kerülnek az általam használt mérési eljárások és a mérési összeállítás.

### 2.1 Teljesítmény LED-ek multi-domain mérése

LED-ek multi-domain mérése alatt azt értjük, hogy a félvezetőt a működését meghatározó minden területre kiterjedve, komplex módon vizsgáljuk az elektromos, termikus és optikai tartományokban. Ez az ún. kombinált termikus és radiometriai/fotometriai karkarakterizáció.

Termikus karkarakterizáció tokozott félvezetők esetében például termikus tranziens tesztelés segítségével végezhető [11]. A mérés során a diódát hagyjuk felmelegedni a normál működési árammal hajtva, amit ezután lekapcsolunk, ezzel disszipációs ugrást létrehozva a rendszer bemenetén. A továbbiakban az ún. mérőárammal, egy a normál üzemi áramnál jelentősen kisebb árammal mérhetjük a dióda nyitófeszültségét annak hűlése közben.

Amennyiben a nyitófeszültség hőmérsékletfüggése (avagy, legalább annak meredeksége, az ún. K-faktor [12]-[14]) ismert, akkor meghatározhatóvá válik az

eszköz hőmérséklete a teljes tranziens során, az adott mérési elrendezésnél megkapjuk a rendszer termikus ugrásválasztát. Ha ezt a hőmérsékleti tranziens elosztjuk a disszipáció ugrás értékével, akkor megkapjuk az eszköz termikus impedanciáját, az ún.  $Z_{th}$  függvényt.

Mivel LED-ek esetében a felvett elektromos teljesítmény egy meghatározó része fényként távozik a félvezetőből, a fent említett termikus karakterizációt ki kell egészíteni radiometriai mérésekkel, a disszipált teljesítmény pontos értékének meghatározásához. Ezek a mérések leggyakrabban egy integráló (fotométer) gömb segítségével készülnek (lásd a 2.2.2 szakaszt).

## 2.2 Mérési összeállítás

A tanszéken rendelkezésre álló LED mérő állomás a Dr. Székely Vladimir vezetése alatt tervezett T3Ster [15] és a később, szintén a tanszéken kifejlesztett TeraLED [16] eszközökből és az őket vezérlő asztali számítógépből áll.

### 2.2.1 A T3Ster és TeraLED műszeregyüttes

A T3Ster egy termikus mérő műszer (*Thermal Transient Tester*), ami félvezető eszközök termikus karakterizációjára és minősítésére használható. Egyaránt szolgáltatja a tranziens méréshez szükséges fűtő- és mérőáramot. A műszer rögzíti a félvezető teljesítményre adott termikus választát, a hozzá tartozó szoftver segítségével az eltárolt mérési adatokat ki is értékelhetjük.

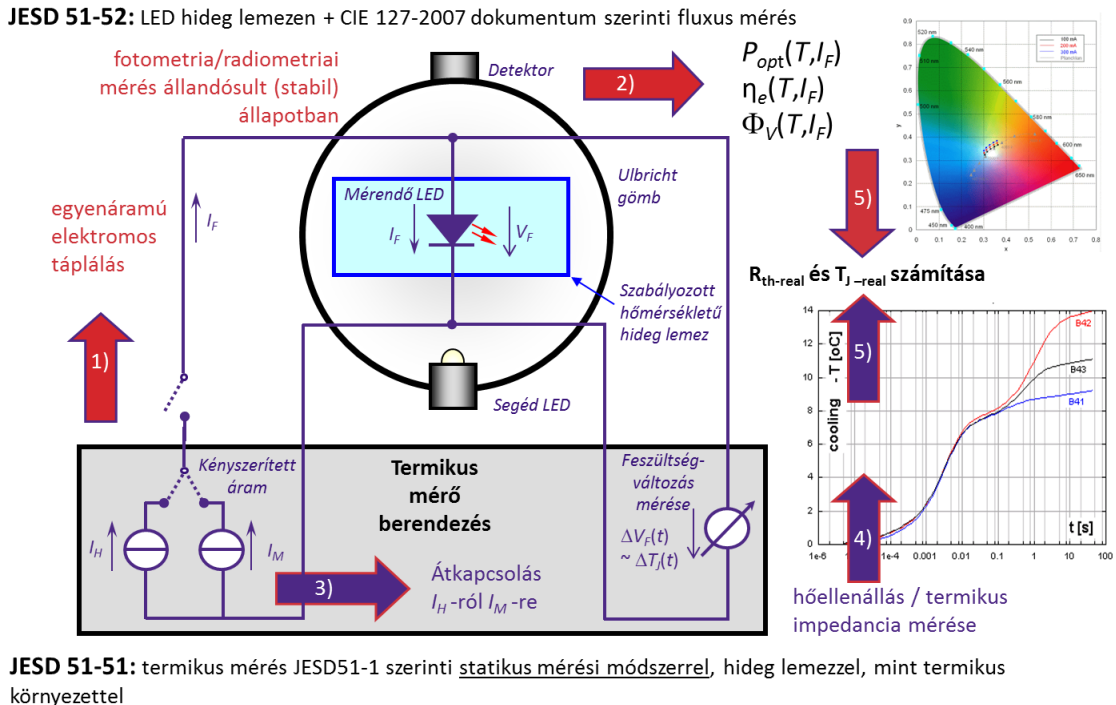
A TeraLED eszköz LED-ek radiometriai/fotometriai mérésére szolgál. Az integráló gömbhöz csatlakoztatott szabályozható termosztátot vezérli, valamint szükség esetén további elektromos táplálást biztosít a mérendő eszköz számára, amennyiben a műszeregyüttesből a T3Ster berendezés nem lenne jelen.

A T3Ster és a TeraLED eszközökkel együtt ún. kombinált termikus és radiometria/fotometriai mérést valósíthatunk meg, melynek segítségével elkészíthetjük a mért eszköz kompakt multi-domain modelljét. A mérési megoldás megfelel a JEDEC JESD51-5x szabványcsaládban leírtaknak [17]-[20] és eleget tesz a CIE által publikált 127:2007 és 225:2017 technikai jelentések [21], [22] ajánlásainak [23].

A felsorolt eszközök vezérlését a *T3Ster Measurement Control Tool* és a *TeraLED Measurement Control Tool* szoftverek valósítják meg. Kombinált mérések esetén a *TeraLED Measurement Control Tool* full-master szoftverként szolgál, azaz



automata módon vezérli a másik szoftvert és a hozzájuk tartozó hardvereket is. A mérési eredmények kiértékelése a *T3SterMaster* és a *TeraLED View* célszoftverek segítségével automatizált módon is elvégezhető. A teljes elrendezést a 2.1. ábra szemlélteti.



**2.1. ábra.** A Dr. Poppe András által javasolt kombinált termikus és radiometriai/fotometria LED mérési összeállítás és a mérési folyamat vázlatja. [24]

## 2.2.2 Integráló (fotométer) gömb

A LED-ek optikai mérésére legszélesebb körben használt eszköz az integráló, más néven *Ulbricht* gömb. Az ilyen eszközök belsejét egy nagy reflexiójú anyaggal vonják be, amely a fényt a látható hullámhossztartományban diffúz módon veri vissza, ún. Lambert felületként. Ebből adódóan a gömb belső falán a megvilágítás minden pontban közel azonos lesz. A gömb felületén különböző optikai nyílásokat alakítanak ki, ezeken keresztül helyezhetjük el a gömb belsejében a mérendő eszközt hordozójával együtt, illetve a méréshez szükséges további eszközöket, mint a referencia fényforrást és különböző detektorokat.

## 2.2.3 Spektrális mérések

A rendszer továbbá kiegészíthető spektroradiométerrel is, amelynek segítségével a fény spektrális teljesítményeloszlása vizsgálhatóvá válik.

Az angol terminológiában „*array spectrometer*”-ként elnevezett műszerek a spektrométerben található diffrakciós rács segítségével a vizsgálandó fénysugarat először komponenseire bontják, majd a komponenseket egy detektor-sorra vetíti, így elkülönítve az egyes hullámhosszokhoz tartozó mérendő jelek kiértékelését. Ezek előnye, hogy a detektorsor egyidejűleg, párhuzamosan rögzíti a teljes spektrum egyes komponenseit, így nagyon rövid mérési idők érhetők el, jellemzően a 10  $\mu$ s...100 ms időtartományban. A tanszéki elrendezésben ezt a feladatot az Instrument Systems CAS 140CT típusú spektrométer [25] látja el.

### 3 Monokromatikus LED-ek spektrumának modellezése

A teljesítmény LED-ek rohamos fejlődése és a világítástechnikai iparban történő elterjedése magával hozta a számítógéppel segített tervezés eszközei iránti egyre növekvő igényeket is. Az úgynevezett Ipar 4.0 szemlélet alappillére, hogy az új eszköz már digitális tervezőasztalon készül, a rendszer komponenseinek digitális ikrei segítségével. A teljesítmény LED-ek multi-domain modellezése már évtizedes múltra tekint vissza (lásd a [26] számú hivatkozás történeti áttekintését), de a tématerület jelenleg is aktív kutatások tárgyát képezi [27]. A BME VIK Elektronikus Eszközök tanszékének egyik legkurrensebb kutatásai közé tartozik a LED-ek élettartam multi-domain modellezése [26], [28]; a munka alkalmas és időszerű továbbfejlesztése lenne a modell spektrális teljesítményeloszlással történő kibővítése.

A LED-ek spektrális teljesítményeloszlásának modellezésére tett törekvések egyikeként 2005-ben egy Gauss-féle modellt találtak a legmegfelelőbbnek [30], amely modell már tartalmazta a lapkahőmérséklet (a pn átmenet hőmérséklet) változásával járó csúcsérték eltolódást is [31].

Egy 2008-as tanulmányban [29] a szerzők több matematikai modellt is javasoltak monokromatikus LED-ek spektrumának leírására. A függvényeknek az alábbi kritériumoknak kell megfelelni:

- Megfelelő alakkal és paraméterezéssel rendelkezzenek.
- Jó pontossággal közelítsék a mért spektrális értékeket.
- Könnyen, egyértelműen értelmezhető paraméterekkel rendelkezzenek.
- A modell paraméterei könnyen megállapíthatók legyenek a spektrális mérési eredményekből.

A kutatásban javasolt függvényeket az I. Táblázat mutatja be (a függvények elnevezései megfelelnek a [29] számú referencia 3-as számú táblázatában közölt nevekkel). A szerzők megállapítása szerint a fenti kitételeknek leginkább a „*Logistic Power Peak*” függvény felelt meg. Emellett megemlítik, hogy az (5)-ös és a (8)-as függvények szimmetrikusságuk miatt nem illeszthetők megfelelően a legtöbb esetben aszimmetrikus spektrumhoz, így ezeket elvetették. A (7)-es, (13)-as és a (14)-es

függvények, habár jól közelítik a spektrumot, paramétereik nem egyértelműen megállapíthatók egy közvetlen spektrális mérésből. Egy másik lehetőség az aszimmetrikusság kezelésére a függvények két tartományban való szétválasztása, ilyenek a (6)-os és (12)-es függvények. Az ilyen esetekben viszont a függvény nem folytonos, ezért a szerzők ezeket is kizárták. A megmaradt egyenletek ((9), (10)) a fent említett kritériumok alapján megfelelőnek bizonyultak a spektrum modellezéséhez.

**I. Táblázat. Monokromatikus LED-ek spektrális teljesítményeloszlásának modellezésére javasolt matematikai függvények; a 2008-as tanulmány [29] 3-as számú táblázata alapján.**

Függvény neve	Függvény $f(\lambda)$	
Gaussian	$f(\lambda) = A \cdot e^{-\left(\frac{\lambda-C}{W}\right)^2}$	(5)
Split Gaussian	$f(\lambda) = A \cdot e^{-\left(\frac{\lambda-C}{W}\right)^2} \begin{cases} \text{ha } \lambda < C, \text{ akkor } W = W_1 \\ \text{egyébként } W = W_2 \end{cases}$	(6)
Sum of Gaussian	$f(\lambda) = A_1 \cdot e^{-\left(\frac{\lambda-C}{W_1}\right)^2} + A_2 \cdot e^{-\left(\frac{\lambda-C}{W_2}\right)^2}$	(7)
Second order Lorentzian	$f(\lambda) = \frac{A}{\left(1 + \left(\frac{\lambda-C}{W}\right)^2\right)^2}$	(8)
Logistic Power Peak	$f(\lambda) = \frac{A}{S} \left(1 + e^{\frac{\lambda-C+W \cdot \ln(S)}{W}}\right)^{-\frac{S-1}{S}} \cdot e^{\frac{\lambda-C+W \cdot \ln(S)}{W}} \cdot (S+1)^{\frac{S+1}{S}}$	(9)
Asymmetric logistic peak	$f(\lambda) = A \left(1 + e^{\frac{\lambda-C+W \cdot \ln(S)}{W}}\right)^{-S-1} S^{-S} \cdot e^{\frac{\lambda-C+W \cdot \ln(S)}{W}} \cdot (S+1)^{\frac{S+1}{S}}$	(10)
Pearson VII	$f(\lambda) = \frac{A}{\left(1 + \left(\frac{\lambda-C}{W}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{2^S-1}\right)\right)^S}$	(11)
Split Pearson VII	$f(\lambda) = \frac{A}{\left(1 + \left(\frac{\lambda-C}{W}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{2^S-1}\right)\right)^S} \begin{cases} \text{ha } \lambda < C, \text{ akkor } W = W_1, S = S_1 \\ \text{egyébként } W = W_2, S = S_2 \end{cases}$	(12)
Asymmetric Double sigmoidal	$f(\lambda) = \frac{A}{1 + e^{\frac{\lambda-C}{S_1}}} \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + e^{\frac{\lambda-C}{S_2}}}\right)$	(13)
Harmadfokú illesztés	<i>hullámhosszonként:</i> $f(\lambda) = a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0$	(14)

A modellezés folyamán meghatározták a függvények paramétereit és azok illeszkedésének relatív hibáját. Ennek megfelelően a (9)-es függvény, angol elnevezésével a „*Logistic Power Peak*” bizonyult a legalkalmasabbnak. Ahhoz, hogy

megfelelően modellezhető legyen a hőmérséklet és az áramfüggés is, a modell további kiegészítéseket igényel. Így a (9)-es függvény paramétereit a nyitóáram és a pn átmenet hőmérséklet függésében az alábbi ((15)-től (18)-ig) függvényeknek megfelelően paraméterezték fel.

$$A(T, i) = a_0 \cdot T^a \cdot i^a \quad (15)$$

$$C(T, i) = c_0 + c_T \cdot T + c_i \cdot \log(i) \quad (16)$$

$$S(T, i) = s_0 + s_T \cdot T + s_i \cdot \log(i) \quad (17)$$

$$W(T, i) = w_0 + w_T \cdot T + w_i \cdot i^a \quad (18)$$

Ezzel a paraméterezéssel modellezhetővé válik a spektrum a pn átmenet hőmérséklet, a nyitóáram és a hullámhossz függvényében:

$$f(T, i, \lambda) = \frac{A(T, i)}{S(T, i)} \left[ 1 + e^{\frac{\lambda - C(T, i) + W(T, i) \cdot \ln(S(T, i))}{W(T, i)}} \right]^{\frac{-S(T, i) - 1}{S(T, i)}} \cdot e^{\frac{\lambda - C(T, i) + W(T, i) \cdot \ln(S(T, i))}{W(T, i)}} \cdot [S(T, i) + 1]^{\frac{S(T, i) + 1}{S(T, i)}} \quad (19)$$

Egy 2010-es tanulmányban [32] és az azt követő doktori értekezésben [33] a korábban leírt, pusztán matematikai függvények helyett egy olyan spektrum modellt készítettek, amely explicit módon tartalmazta a mögöttes fizikai tartalmat is. Így például, a Boltzmann-eloszlást a félvezető lapka hőmérsékletének függvényében, a tiltott sáv szélesség változását, valamint a pn átmenet hőmérséklet növekedéséből fakadó fénykibocsátással nem járó rekombinációk számának növekedését.

Első modellezési próbálkozásként a tanulmányban két darab exponenciális segítségével közelítették a spektrumot. Majd úgy egészítették ki azt, hogy tartalmazza a Boltzmann-eloszlást. Ezután megfigyelték, hogy az így kapott és a mért eloszlás különbsége jól közelíthető egy Gauss-eloszlással. Ennek megfelelően a képlethez hozzáadtak egy Gauss-eloszlást, megalkotva egy kezdetleges modellt:

$$\Phi_{e, \nu} = \frac{1}{S_1 \exp[-a(\nu - \nu_p)] + S_2 \exp\left[\frac{h}{kT_c}(\nu - \nu_p)\right]} + S_3 \exp\left[-\left(\frac{\nu - \nu_G}{b}\right)^2\right] \quad (20)$$

Ez a modell felfogható úgy is mint a Yoshihiro Ohno által bemutatott dupla Gauss-eloszlás modell egy variációja [34].

Ezután ezt a modellt átalakítva hoztak létre egy a fent említett elvárásoknak megfelelő hőmérsékletfüggő spektrum modellt:

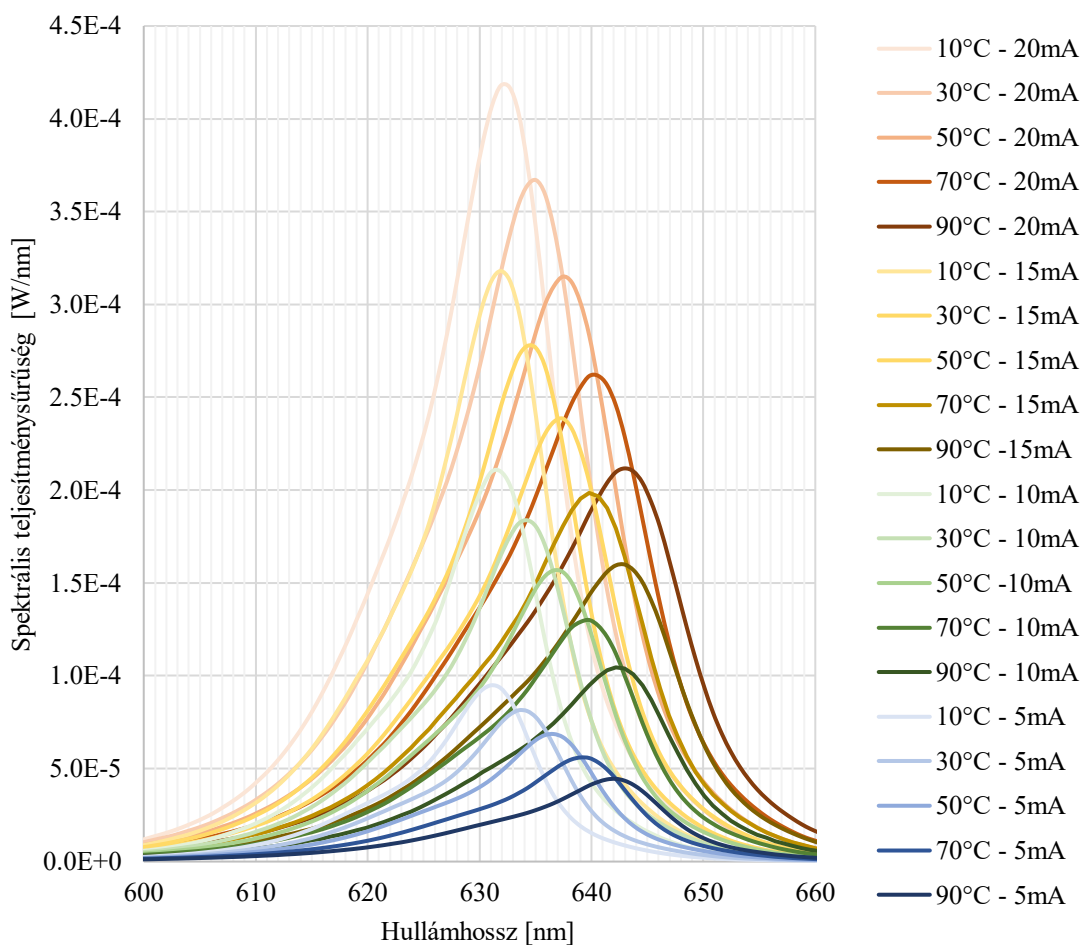
$$\Phi_{e,v}(T) \approx \left\{ \frac{1}{S_{1,ref} \exp[-a(v-v_{p,ref}-\gamma_p \Delta T)] + S_{2,ref} \exp\left[\frac{h(v-v_{p,ref}-\gamma_p \Delta T)}{k(c\Delta T + T_{c,ref})}\right]} + S_{3,ref} \exp\left[-\left(\frac{v-v_{p,ref}-\gamma_p \Delta T}{b}\right)^2\right] \right\} \exp\left(-\frac{\Delta T}{T_0}\right) \quad (21)$$

Egy másik 2018-as tanulmányban [35] a spektrum modellezés céljaként egy olyan spektrum modellt tűztek ki, ami képes a spektrum meghatározása bármilyen nyitóáram szint esetén, minimalizálva a szükséges mért fizikai paramétereket és a lehető legkisebb számítási erőforrást igényel. A mért eredményeket „fekete doboz” modell szerint dolgozták fel, vagyis a mögöttes fizikai hatásokat elhanyagolták.

Egy 2022-es tanulmányban [36] 19 darab (egymásra helyezett) különböző eloszlás függvény alapú modellt vizsgáltak meg, 7 darab különböző spektrális teljesítményeloszlású monokromatikus piros, zöld és kék, és 8 darab fénypor alapú, különböző korrelált színhőmérsékletű LED-eken. Minden modellt a sugárzott teljesítmény, színességi koordináták és a bayesian-információs kritérium helyes meghatározó képessége alapján értékelték ki. Ennek a tanulmánynak a konklúziójaként megállapították, hogy egy többszörösen egymásra helyezett (split) Pearson VII (12) modell jelentősen képes felülmúlni a gyakran használt Gauss-féle modell kezdeményezéseket.

## 4 Saját mérési és modellezési eredmények

A modell elkészítéséhez először egy trikromatikus RGB LED modult karakterizáltam a 2.1. és a 2.2. alfejezetekben leírt módszerekkel és műszerekkel. A modul lapkáit először egyesével, majd azokat egyszerre működtetve is megmértem különböző referencia hőmérsékleteken és nyitóáram értékeken. A korábban taglalt mérési módszer eredményeként a referencia környezeti hőmérsékletekből meghatározható a LED-ek üzemi lapkahőmérséklete is, amelynek segítségével a spektrumok hőmérsékletfüggő modelljét közvetlenül a lapkahőmérséklet függvényében lehet elvégezni. A 4.1. ábra a piros LED különböző referencia hőmérsékleteken és nyitóáramokon mért spektrális teljesítményeloszlás görbéit szemlélteti. További mért spektrális teljesítményeloszlásokat lásd a Függelékek alatt.



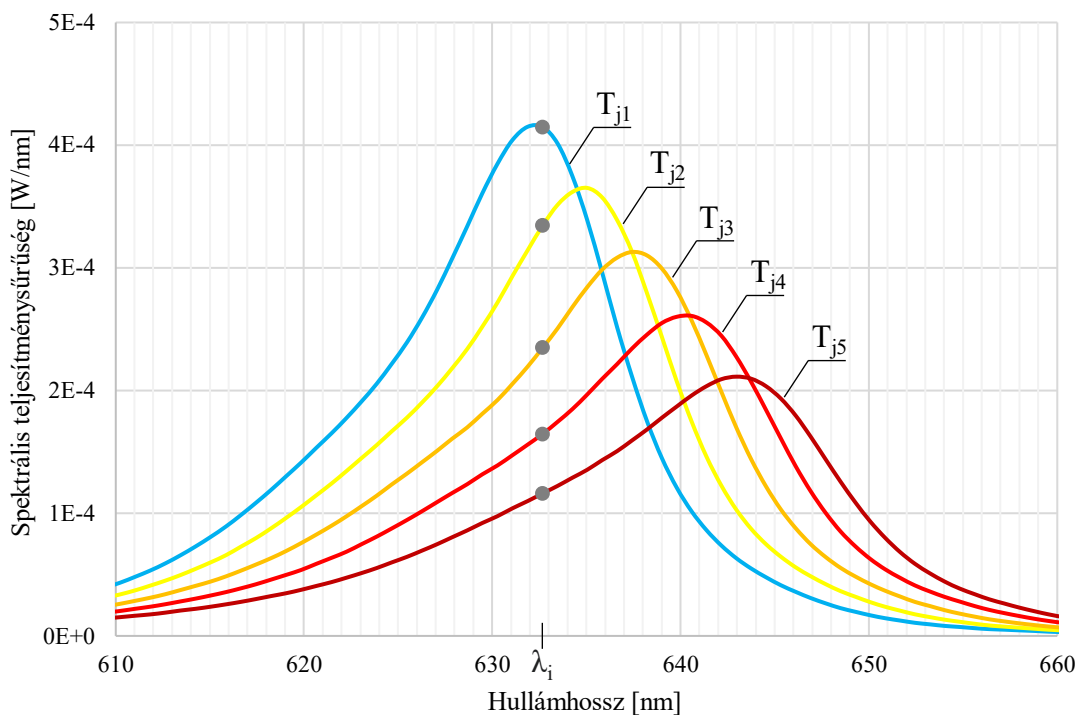
**4.1. ábra. Piros LED minta különböző referencia hőmérsékleteken és nyitóáramokon mért spektrális teljesítményeloszlása.**

## 4.1 Modellezés harmadfokú polinom segítségével

A hőmérsékletfüggő spektrum modell elkészítéséhez először a I. táblázat harmadfokú illesztését valósítottam meg, az alábbi módon:

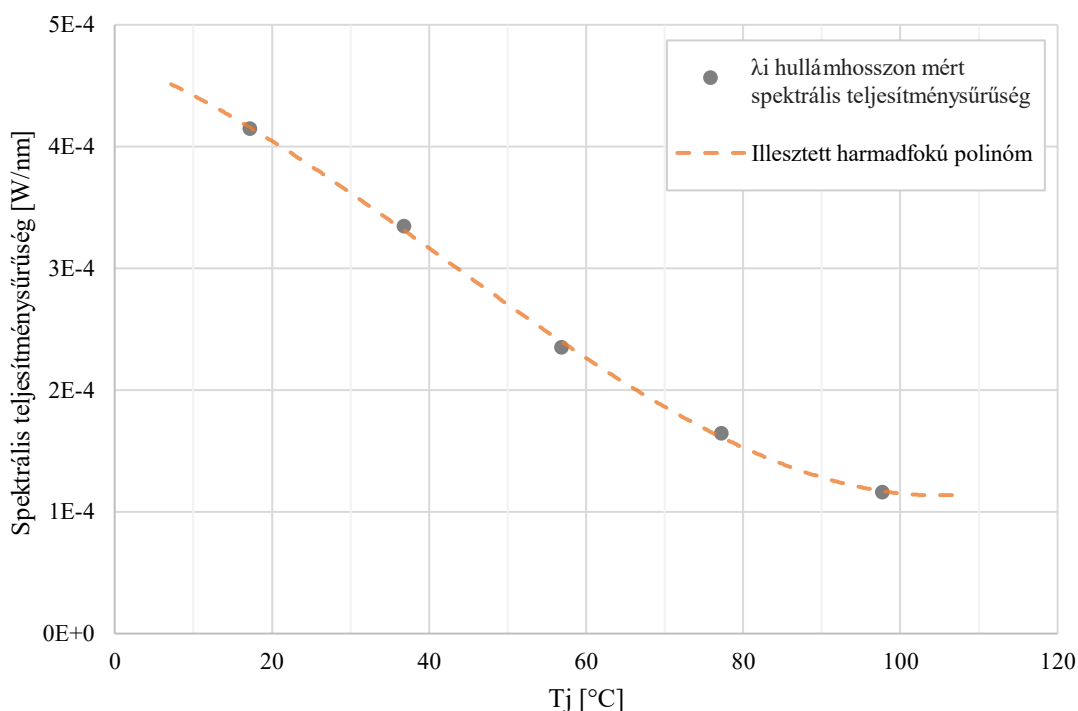
- a különböző pn átmenet hőmérsékleteken ( $T_{jk}, k \in (1, 2, \dots, n)$ , ahol  $n$  a mért lapkahőmérsékletek száma),
- a különböző hullámhosszokon ( $\lambda_i, i \in (1, 2, \dots, m)$ , ahol  $m$  a mért hullámhosszok száma) mérésrel meghatározott
- spektrális teljesítménysűrűségekből ( $SPD_{\lambda_i}(T_j)$ ) adódó pontokra ( $\lambda_i(T_{jk})$ )
- harmadfokú polinomot illesztettem, a lapkahőmérséklet függvényében.

A görbeillesztéssel kapott ( $a_{0\lambda_i}, a_{1\lambda_i}, a_{2\lambda_i}, a_{3\lambda_i}$ ) együtthatókkal kiszámolható a keresett  $SPD_{\lambda_i}(T_j) = a_{3\lambda_i}T_j^3 + a_{2\lambda_i}T_j^2 + a_{1\lambda_i}T_j + a_{0\lambda_i}$  lapkahőmérséklet-függő spektrális teljesítményeloszlás. A modellezési eljárást a 4.2. és a 4.3. ábrák szemléltetik.



4.2. ábra. Egy LED minta különböző lapkahőmérsékleten mért spektrális teljesítményeloszlásai; a szürke pontok a  $\lambda_i = 632,69 \text{ nm}$  hullámhosszon mért értékeket jelölik.





4.3. ábra. Egy LED minta  $\lambda_i = 632,69 \text{ nm}$  hullámhosszon mért spektrális teljesítménysűrűség értékei a lapkahőmérséklet függvényében.

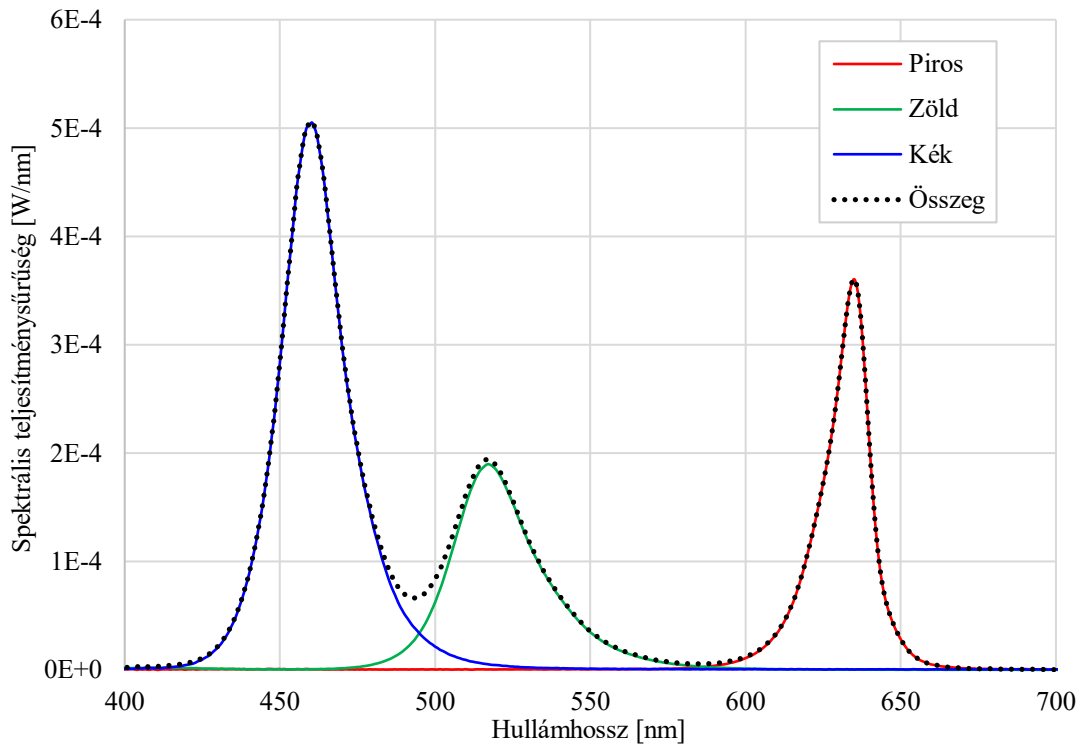
## 4.2 A harmadfokú polinomiális modell implementálása

Egy RGB modul lapkáit egyesével karakterizáltam különböző referencia hőmérsékleteken. Majd a mérési eredményekből a fentebb említett módszerrel elkészítettem a LED-ek harmadfokú polinomiális hőmérsékletfüggő modelljét.

A modell teszteléséhez az RGB LED modul lapkáit egyszerre működtetve is megmértem. Mivel a spektrális teljesítménysűrűség ilyen elrendezés mellett a szuperpozíció elve alapján összegezzhető, a lapkák egyenkénti modelljeit összeadva megkaphatjuk a három LED egyszerre működtetett modelljét (lásd: 4.4. ábra). A teszteléshez ezt a modellt hasonlítom össze a három LED egyszerre mért spektrális teljesítményeloszlásával. Ehhez viszont ismernünk kell a pn átmenet hőmérsékletét mindhárom LED esetében az együttes működtetés során.

A karakterizáció során a lapkák hőmérsékletfüggése ismerté vált, így amennyiben azok nyitófeszültségét ismerjük (mérjük) az együttes működtetés során, akkor megállapítható a pn átmenet üzemi hőmérséklete is. Ehhez az egyes munkapontokban az előzetes karakterizáció során mért nyitófeszültség értékek és a pn átmenet hőmérsékletek közötti összefüggést másodfokú polinom segítségével

közelítettem, a szakirodalomban [12]-[14] is javasolt módon. A mért nyitófeszültség értékeket és az ezek alapján meghatározott lapkahőmérsékleteket a II. Táblázat mutatja be.



4.4. ábra. Az RGB LED modul modellezett egyedi spektrális teljesítményeloszlás görbéi és az összegzésből kapott elvi spektrális teljesítményeloszlás az együttes működtetés során.

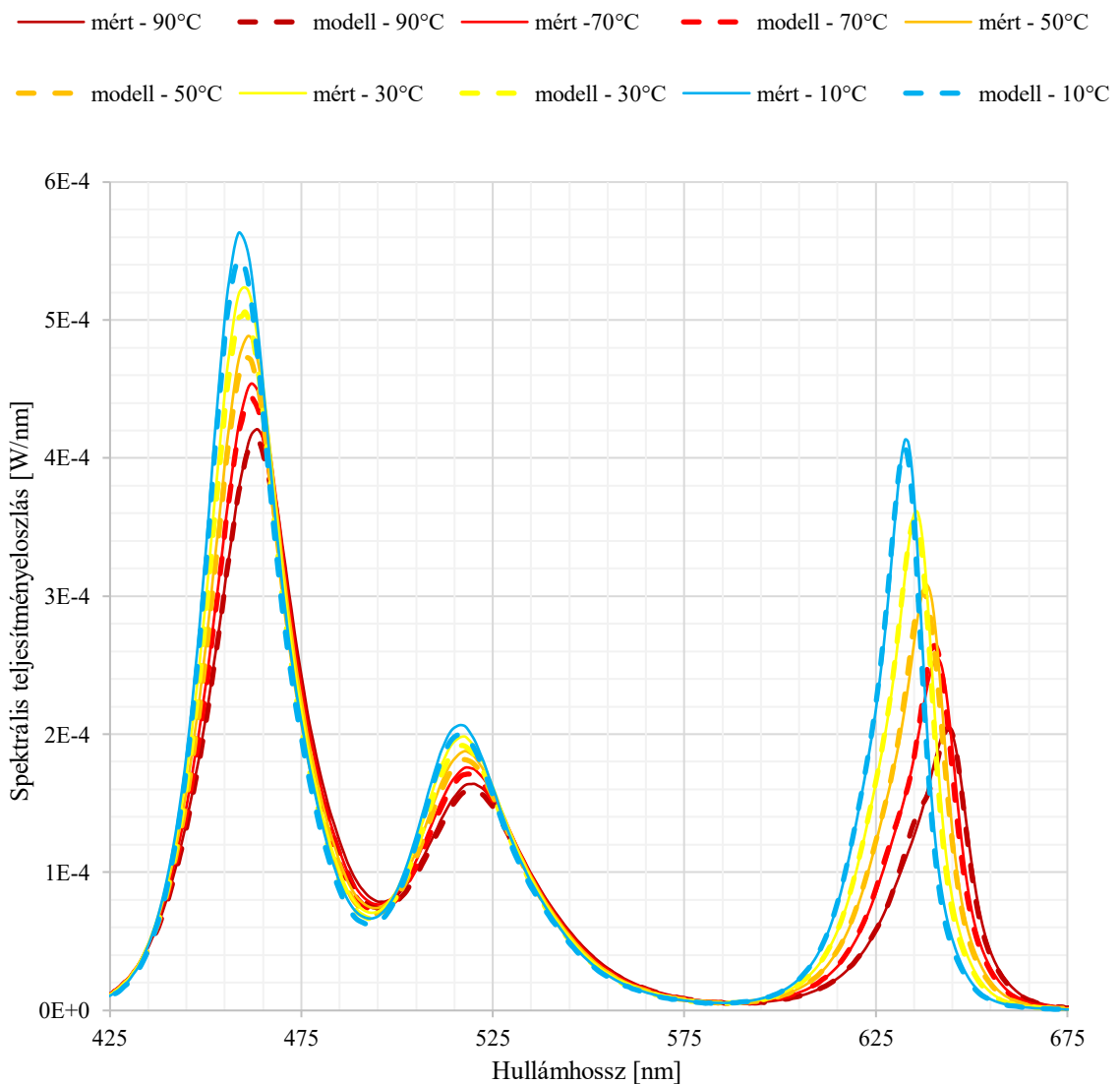
II. Táblázat. Az RGB LED modul egyedi nyitófeszültségei és lapkahőmérsékletei az együttes működtetés során.

		$T_A = 10^\circ\text{C}$	$T_A = 30^\circ\text{C}$	$T_A = 50^\circ\text{C}$	$T_A = 70^\circ\text{C}$	$T_A = 90^\circ\text{C}$
<b>Piros LED</b>	$V_F$ [V]	2,071	2,033	1,998	1,965	1,933
	$T_J$ [°C]	19,53	39,42	59,14	79,30	100,72
<b>Zöld LED</b>	$V_F$ [V]	3,248	3,182	3,127	3,080	3,034
	$T_J$ [°C]	25,62	46,13	65,36	83,99	105,25
<b>Kék LED</b>	$V_F$ [V]	3,357	3,297	3,248	3,208	3,172
	$T_J$ [°C]	21,17	41,21	60,16	78,38	98,45

A fenti táblázatból jól látható, hogy azonos környezeti hőmérséklet esetén még az egy tokban elhelyezett LED lapkák üzemi hőmérséklete is jelentősen eltérő lehet,

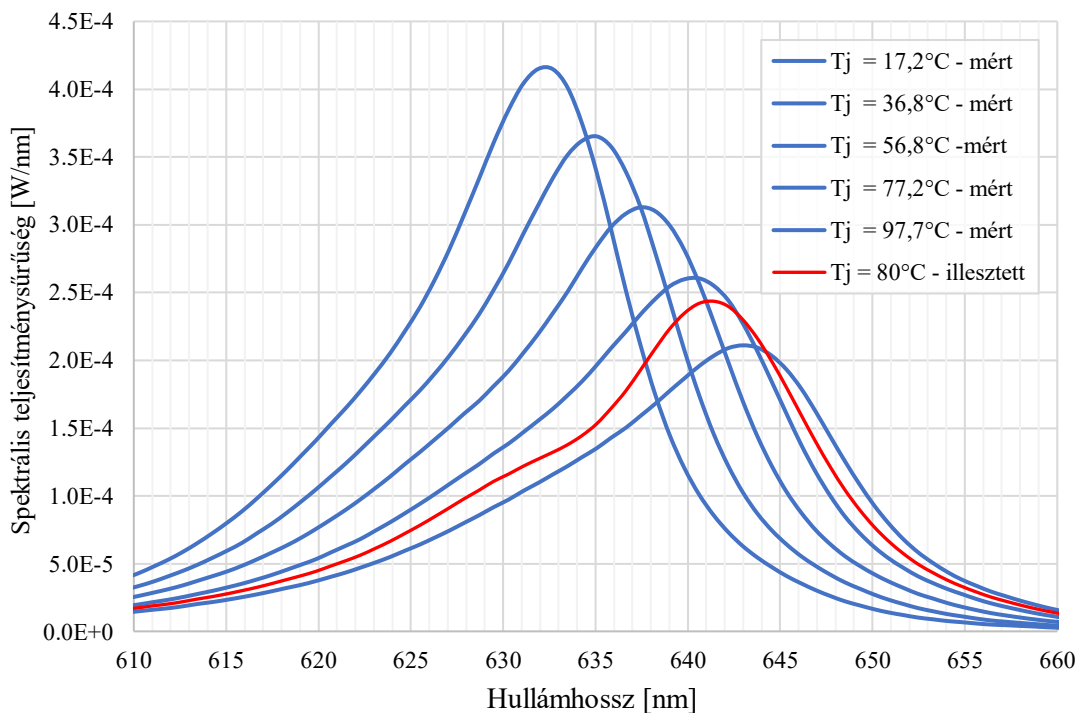
amelynek okai például az eltérő nyitófeszültségek, az ebből fakadóan eltérő felvett elektromos teljesítmények, valamint a különböző hatásfok értékek miatt is eltérő disszipált teljesítmény értékek.

A három LED egyszerre működtetése során megmért nyitófeszültségekből a fent említett módszerrel következtettem a pn átmenetek hőmérsékletére, amely az egyedi LED lapkák spektrum modelljeinek bemeneti értékeként szolgált a modellezés helyes elvégzéséhez. Az így készült modelleket összegeztem, az eredményt pedig összehasonlítottam a három LED együttes működtetése során a 10, 30, 50, 70 és 90 C környezeti hőmérsékleteken mért spektrális teljesítményeloszlás görbékkel. Az így kapott eredményeket a 4.5. ábra szemlélteti.



**4.5. ábra. Az egyedi LED-ek lapkahőmérséklet-függő harmadfokú polinomiális modelleinek segítségével készített elvi görbék összehasonlítása mért spektrális teljesítmény eloszlásokkal.**

Mivel a harmadfokú polinom illesztése diszkrét hullámhossz lépésenként történik, így lényegében az illesztett görbékkel egyes hullámhosszok hőmérsékletfüggését kapjuk meg. Emiatt, és a mérések zajosságából adódóan akár egymáshoz közeli  $\lambda_i$  hullámhosszok is mutathatnak eltérő hőmérsékletfüggő viselkedést, ez kifejezetten problémát jelenthet olyan hullámhosszokon, ahol a spektrális teljesítménysűrűség hőmérsékletfüggő változása nem monoton, például a csúcs hullámhossz eltolódása miatt. Ilyen és ehhez hasonló okok miatt alakulhatnak ki a 4.6 ábrán bemutatott anomália: a LED sugárzott teljesítménye a hőmérséklet növekedésével csökken, azonban, ahogy az az ábrán is látható, a 635 nm hullámhossz környékén ezzel a változással ellentétes hatású a csúcs hullámhossz eltolódása. Itt a hőmérséklet növekedésével a teljesítménysűrűség először növekszik, majd ezután kezd csak csökkenni. Továbbá ez a modell nagy mennyiségű ( $4 \cdot m$  darab), hullámhosszonként négy darab  $(a_{0\lambda_i}, a_{1\lambda_i}, a_{2\lambda_i}, a_{3\lambda_i})$  változó paraméterrel dolgozik, emiatt relatíve nagy a szükséges bemeneti paraméterek száma. Továbbá, az illesztés jellege miatt a nyitóáramfüggő bővítés meglehetősen körülményes lenne és a szükséges modellparaméterek számát is a felhasznált hullámhossz értékek számával arányos módon növelné.



**4.6. ábra. A harmadfokú polinommal, hullámhosszonként történő hőmérsékletfüggő modell illesztési hibái.**

### 4.3 További modellek implementálása

A hullámhosszonkénti, harmadfokú polinommal történő modellezés első kísérletei után a (20)-as számú összefüggéssel, illetve a I. Táblázatban leírt további modelleket implementáltam *MS Excel* környezetben. Az első megközelítésben a munkám kettős volt: egyrészt, alkalmas paraméter identifikációs módszert kerestem, másrészt pedig azt szerettem volna meghatározni, hogy általánosságban melyik modellek illeszkednek legjobban a mért spektrális teljesítményeloszlás görbékre.

Az I. Táblázatban leírt modellek paramétereinek egy része közvetlenül kinyerhető a mérési eredményekből, ilyen például a csúcs hullámhossz és a spektrális teljesítménysűrűség maximális értéke. A további paraméterek meghatározása azonban korántsem triviális, mivel a függvények nemlineárisak és az általánosan alkalmazott módszerek segítségével nem is linearizálhatók [29]. Emiatt a paraméter identifikáció elvégzéséhez a *MS Excel* beépített *Solver* modulját alkalmaztam.

A különböző modellezési lehetőségek alkalmasságának vizsgálatához a korábban bemutatott RGB modul egyedi mérési eredményein túl további négy teljesítmény LED teljes karakterizálását is elvégeztem. A további LED-ek vizsgálatával a célom a látható spektrum minél szélesebb lefedése volt, ezért egy kék, egy zöld, egy borostyánsárga és egy vörös LED mintát választottam ki. Méréssel meghatároztam az üzemi lapkahőmérsékleteket és a hozzájuk tartozó spektrumokat is, a 10 mA ... 1 A nyitóáram és a 10 °C ... 90 C környezeti hőmérséklet tartományokban.

Az illesztetlenség mértékének meghatározására 5 +2 különböző metrikát alkalmaztam, melyek az alábbiak voltak:

- a teljes sugárzott teljesítmény értékek (a mért és modellezett görbék alatti területek) eltérése
- a mért és modellezett görbék különbségfüggvénye alatti terület (ez akkor is lehet véges érték, ha az előző hiba értéke nulla)
- a mért és modellezett értékek legnagyobb eltérése
- a méréssel meghatározott és a görbeillesztés után kapott csúcs hullámhosszok eltérése
- a mért és modellezett spektrumok szabványos CIE  $u',v'$  színtérben meghatározott eltérése [37]

- a sugárzott teljesítmény és a legnagyobb eltérés abszolút értékeinek össze, az *MS Excel Solver* célértékének beállításához
- a mért és modellezett görbék közötti  $R^2$  hibaértéke

A kapott modellek illesztetlenségi hibáit a III és IV Táblázatok mutatják be. Az eredmények alapján egyértelműen elmondható, hogy a *Solver* nem minden esetben találta meg az optimális megoldást; egyes esetekben a megoldó algoritmus valószínűleg csak a hibaérték egy lokális minimumánál „ragadt be”, más esetekben vélhetően nem is konvergált a megoldás (pl. ahol a csúcs hullámhossz értéke jelentős hibát szenved). A paraméter identifikáció tehát egyértelműen optimalizálásra, továbbdolgozásra szorul, azonban a legkisebb illesztési hibák alapján így is elmondható, hogy a három legalkalmasabb modell a *Split Pearson VII*, a *Logistic power peak*, valamint az Arno Keppens által javasolt összefüggés.

### III. Táblázat. Az RGB modul egyedi LED spektrumaira illesztett modellek hibaértékei.

<b>Gaussian</b>							
	$\Phi$ e Error:	Sum abs error:	Max error:	$\lambda$ peak error	$\Delta$ u',v'	Fitting Error	R <sup>2</sup> Error
Min	-15%	868%	20%	-5.52	0.0019	<b>23%</b>	0.9051
Avr.	-7%	1158%	29%	0.94	0.0089	<b>36%</b>	0.9541
Max.	0%	1504%	41%	5.93	0.0160	<b>51%</b>	0.9873

<b>Split Gaussian</b>							
	$\Phi$ e Error:	Sum abs error:	Max error:	$\lambda$ peak error	$\Delta$ u',v'	Fitting Error	R <sup>2</sup> Error
Min	-9%	562%	14%	-3.30	0.0037	<b>17%</b>	0.9658
Avr.	-4%	720%	19%	-0.94	0.0101	<b>23%</b>	0.9830
Max.	0%	920%	27%	0.52	0.0161	<b>34%</b>	0.9921

<b>Sum of Gaussians</b>							
	$\Phi$ e Error:	Sum abs error:	Max error:	$\lambda$ peak error	$\Delta$ u',v'	Fitting Error	R <sup>2</sup> Error
Min	-57%	72%	6%	-6.46	0.0022	<b>8%</b>	0.3166
Avr.	-13%	900%	31%	0.34	0.0142	<b>44%</b>	0.9451
Max.	2%	5885%	180%	20.98	0.1494	<b>237%</b>	0.9995

<b>Second order Lorentzian</b>							
	$\Phi$ e Error:	Sum abs error:	Max error:	$\lambda$ peak error	$\Delta$ u',v'	Fitting Error	R <sup>2</sup> Error
Min	-10%	382%	8%	-5.52	0.0005	<b>8%</b>	0.8961
Avr.	-1%	860%	23%	0.86	0.0030	<b>24%</b>	0.9710
Max.	1%	1323%	46%	4.80	0.0094	<b>48%</b>	0.9973

<b>Asymmetric logistic peak</b>							
	$\Phi$ e Error:	Sum abs error:	Max error:	$\lambda$ peak error	$\Delta$ u',v'	Fitting Error	R <sup>2</sup> Error
Min	-16%	247%	8%	-2.75	0.0004	<b>9%</b>	0.9396
Avr.	-3%	517%	16%	0.07	0.0062	<b>19%</b>	0.9886
Max.	6%	1314%	50%	2.18	0.0182	<b>57%</b>	0.9966

<b>Pearson VII</b>							
	$\Phi$ e Error:	Sum abs error:	Max error:	$\lambda$ peak error	$\Delta$ u',v'	Fitting Error	R <sup>2</sup> Error
Min	-9%	386%	8%	-2.99	0.0019	<b>8%</b>	0.9124
Avr.	1%	985%	25%	1.01	0.0162	<b>26%</b>	0.9705
Max.	17%	2247%	49%	6.72	0.0665	<b>56%</b>	0.9970

**Asymmetric double sigmoidial**

	$\Phi$ e Error:	Sum abs error:	Max error:	$\lambda$ peak error	$\Delta$ u',v'	Fitting Error	R <sup>2</sup> Error
Min	-4%	148%	4%	-167.12	0.0005	<b>5%</b>	0.0011
Avr.	-1%	1528%	119%	47.56	0.0324	<b>29%</b>	0.7865
Max.	0%	20632%	5294%	472.52	0.3168	<b>100%</b>	0.9993

**Logistic power peak**

	$\Phi$ e Error:	Sum abs error:	Max error:	$\lambda$ peak error	$\Delta$ u',v'	Fitting Error	R <sup>2</sup> Error
Min	-11%	114%	4%	-343.48	0.0008	<b>4%</b>	0.0058
Avr.	9%	677%	20%	-29.18	0.0334	<b>32%</b>	0.9080
Max.	609%	4732%	98%	0.79	0.3380	<b>691%</b>	0.9997

**Split Pearson VII**

	$\Phi$ e Error:	Sum abs error:	Max error:	$\lambda$ peak error	$\Delta$ u',v'	Fitting Error	R <sup>2</sup> Error
Min	0%	90%	3%	-1.36	0.0024	<b>3%</b>	0.9888
Avr.	1%	246%	7%	-0.05	0.0145	<b>8%</b>	0.9974
Max.	6%	527%	15%	1.37	0.0588	<b>19%</b>	0.9997

**Keppens-form**

	$\Phi$ e Error:	Sum abs error:	Max error:	$\lambda$ peak error	$\Delta$ u',v'	Fitting Error	R <sup>2</sup> Error
Min	-1%	30%	1%	0.04	0.0007	<b>1%</b>	0.9966
Avr.	0%	129%	4%	0.45	0.0018	<b>4%</b>	0.9995
Max.	1%	282%	9%	1.18	0.0061	<b>9%</b>	0.9999

**IV. Táblázat. A kék, zöld, borostyán és vörös LED-ek spektrumaira illesztett modellek hibaértékei.****Gaussian**

	$\Phi$ e Error:	Sum abs error:	Max error:	$\lambda$ peak error	$\Delta$ u',v'	Fitting Error	R <sup>2</sup> Error
Min	-13%	518%	20%	-7.24	0.0014	<b>21%</b>	0.8745
Avr.	-7%	1066%	30%	-1.28	0.0078	<b>37%</b>	0.9566
Max.	0%	1635%	49%	5.42	0.0144	<b>59%</b>	0.9877

**Split Gaussian**

	$\Phi$ e Error:	Sum abs error:	Max error:	$\lambda$ peak error	$\Delta$ u',v'	Fitting Error	R <sup>2</sup> Error
Min	-10%	537%	12%	-2.92	0.0016	<b>16%</b>	0.9567
Avr.	-3%	750%	22%	-0.63	0.0082	<b>26%</b>	0.9817
Max.	5%	1238%	62%	1.35	0.0136	<b>65%</b>	0.9925

**Sum of Gaussians**

	$\Phi$ e Error:	Sum abs error:	Max error:	$\lambda$ peak error	$\Delta$ u',v'	Fitting Error	R <sup>2</sup> Error
Min	-29%	64%	4%	-5.07	0.0020	<b>7%</b>	0.7793
Avr.	-3%	548%	20%	-0.32	0.0109	<b>27%</b>	0.9794
Max.	27%	3547%	75%	6.30	0.0798	<b>99%</b>	0.9996

**Second order Lorentzian**

	$\Phi$ e Error:	Sum abs error:	Max error:	$\lambda$ peak error	$\Delta$ u',v'	Fitting Error	R <sup>2</sup> Error
Min	-2%	218%	7%	-5.73	0.0000	<b>7%</b>	0.9223
Avr.	0%	761%	21%	-1.03	0.0025	<b>21%</b>	0.9725
Max.	3%	1422%	37%	4.61	0.0158	<b>37%</b>	0.9987

**Asymmetric logistic peak**

	$\Phi$ e Error:	Sum abs error:	Max error:	$\lambda$ peak error	$\Delta$ u',v'	Fitting Error	R <sup>2</sup> Error
Min	-8%	195%	6%	-4.07	0.0001	<b>6%</b>	0.9588
Avr.	-1%	490%	15%	-0.52	0.0048	<b>17%</b>	0.9910
Max.	16%	1447%	47%	1.89	0.0141	<b>62%</b>	0.9979

**Pearson VII**

	$\Phi$ e Error:	Sum abs error:	Max error:	$\lambda$ peak error	$\Delta$ u',v'	Fitting Error	R <sup>2</sup> Error
Min	-3%	223%	7%	-4.86	0.0005	<b>8%</b>	0.9062
Avr.	1%	872%	23%	-0.48	0.0361	<b>24%</b>	0.9756
Max.	17%	2264%	45%	7.23	0.1482	<b>57%</b>	0.9985

**Asymmetric double sigmoidal**

	$\Phi$ e Error:	Sum abs error:	Max error:	$\lambda$ peak error	$\Delta$ u',v'	Fitting Error	R <sup>2</sup> Error
Min	-13%	141%	4%	-369.57	0.0000	<b>4%</b>	0.0007
Avr.	22%	1118%	26%	-20.36	0.0502	<b>51%</b>	0.8529
Max.	2219%	6734%	108%	506.94	0.4577	<b>2328%</b>	0.9993

**Logistic power peak**

	$\Phi$ e Error:	Sum abs error:	Max error:	$\lambda$ peak error	$\Delta$ u',v'	Fitting Error	R <sup>2</sup> Error
Min	-8%	115%	3%	-371.87	0.0004	<b>3%</b>	0.0033
Avr.	20%	964%	27%	-41.43	0.0420	<b>51%</b>	0.8727
Max.	729%	6546%	98%	0.64	0.3781	<b>809%</b>	0.9997

**Split Pearson VII**

	$\Phi$ e Error:	Sum abs error:	Max error:	$\lambda$ peak error	$\Delta$ u',v'	Fitting Error	R <sup>2</sup> Error
Min	0%	54%	3%	-1.20	0.0035	<b>3%</b>	0.9895
Avr.	1%	234%	7%	0.20	0.0254	<b>8%</b>	0.9978
Max.	6%	917%	25%	1.65	0.0962	<b>25%</b>	0.9996

**Keppens-form**

	$\Phi$ e Error:	Sum abs error:	Max error:	$\lambda$ peak error	$\Delta$ u',v'	Fitting Error	R <sup>2</sup> Error
Min	-6%	7%	0%	0.00	0.0002	<b>1%</b>	0.9881
Avr.	0%	151%	5%	0.53	0.0027	<b>6%</b>	0.9984
Max.	4%	430%	15%	1.77	0.0120	<b>16%</b>	1.0000



## 5 Összegzés, kitekintés, hasznosulás

A jelen dokumentumban leírt munkám során röviden összegeztem a fehér fény LED-ek segítségével történő keltésének leggyakoribb módjait. Jelenleg a világítástechnika iparban leggyakrabban előforduló fehér, LED alapú fényforrások az úgynevezett hullámhossz-konverzió alapuló megoldások, amelyek mellett a monokromatikus LED-eket tartalmazó és színkeverésen alapuló, gyakran *RGB*, vagy *RGBW* elnevezéssel illetett LED modulok alkalmazása inkább a speciálisabb megvilágítási feladatokra korlátozódik, ahol a világítás egyes fénytani paramétereinek in-situ változtathatósága a cél. A fényporos megoldások hatásfokának azonban a Stokes-eltolódás által megszabott elvi felső határa van, míg az egyedi, monokromatikus LED-ek hatásfokát elsősorban a technológia kiforrottsága korlátozza. Mindez ma már a világítástechnika ipar szakembereiben is felveti annak lehetőségét, hogy a közeljövőben (kb. 10 éves időtávlatban) a színkeveréses megoldások hatásfokukat és fényhasznosításukat tekintve már túlszárnyalják a fényporos megoldásokat.

A színkeverésen alapuló, monokromatikus LED alapú fehér fényforrások által keltett szín-észlelet a környezeti hőmérséklet, a nyitóáram és az üzemidőtől függő öregedés függvényében erősen változó lehet. A megfelelő ismeretek birtokában azonban ezek a függések kompenzálhatók, amelyhez elsődlegesen szükséges a felhasznált LED-ek úgynevezett multi-domain mérése és modellezése. Az ilyen modellek elkészítése jelenleg is aktív kutatási téma tárgyát képezik a BME Elektronikus Eszközök Tanszékén, a rendelkezésre álló modellek azonban nem tartalmazzák a LED-ek spektrális teljesítményeloszlására vonatkozó paramétereket, azok segítségével csak a sugárzott teljesítmény és a fényáram értékei meghatározhatók, míg a különböző szín- és fénytani paraméterek ismeretlenek maradnak.

A munkám során irodalomkutatást végeztem a spektrális teljesítményeloszlás jelenleg rendelkezésre álló modellezési lehetőségeiről. Ennek során külön figyelmet fordítottam azokra a megoldásokra, ahol a modell figyelembe veszi a LED-ek hőmérsékletét és nyitóáramát is. A rendelkezésre álló modellek közül – az általam kitalált módszer ellenőrzése céljából – először a pontonkénti harmadfokú polinomos modellezést implementáltam, amelyhez saját multi-domain LED mérési eredményeimet használtam fel. Ehhez először csipenként bekarakterizáltam egy kisteljesítményű RGB

modult, ezzel feltárva a spektrális teljesítményeloszlás környezeti- és lapkahőmérséklettől, valamint nyitóáramtól való függését. Ezt követően az RGB modul mindhárom LED-et működtetve is megmértem, eközben mérve a teljes spektrális teljesítményeloszlást és a LED-ek egyenkénti üzemi nyitófeszültségeit is, amelynek segítségével később meghatároztam az egyedi üzemi lapkahőmérsékleteket is. Végül, a mért üzemi nyitóáram és egyedi lapkahőmérsékletek ismeretében, valamint a harmadfokú polinomos modellt felhasználva elvégeztem az RGB modul együttes működésének szimulációit is, a környezeti hőmérséklet függvényében, az eredményeket pedig összevetettem a mért spektrális teljesítményeloszlás görbével.

Munkám zárásaként további, a szakirodalomban fellelhető spektrális teljesítményeloszlás modelleket is implementáltam a saját mérési eredményeimre. Célom a legalkalmasabb modellek kiválasztása volt, amelyekre a paraméter identifikációt követően a legkisebb hibával illeszthetők a legváltozatosabb monokromatikus LED spektrális teljesítményeloszlás függvények. Ehhez az RGB modulon készített méréseimen felül további négy darab, egy kék, egy zöld, egy borostyán és egy piros színű LED teljes karakterizálását is elvégeztem, a mért, összesen közel 200 darab spektrális teljesítményeloszlásra pedig elvégeztem az összesen tíz különböző modell illesztését. A kapott eredmények alapján a további munkámhoz a *Split Pearson VII* és a *Logistic power peak* modelleket, valamint az az Arno Keppens által javasolt összefüggést választottam ki.

Munkám folytatásaként a kiválasztott modellek kiterjesztését tervezem a nyitóáram és a lapkahőmérséklet tekintetében. Ehhez először a szakirodalomban tárgyalt és bemutatott összefüggéseket tervezem a mérési eredményeimhez illeszteni, ezután további modellezési lehetőségeket is meg fogok vizsgálni, a kapott eredmények tükrében pedig javaslatot teszek majd saját a modellezési ötleteimre is.

További munkáim fő célkitűzése egy olyan működési séma megvalósítása, amelynek segítségével a színkeverésen alapuló, monokromatikus LED-eket felszánáló fényforrások egyes fény- és színtani paraméterei (pl. összfényáram, korrelált színhőmérséklet, színvisszaadási index és a többi) állandóvá tehetők a környezeti hőmérséklet függvényében, az egyedi LED csipek nyitóáramának változtatása révén. A séma kialakításakor azt is meg fogom vizsgálni, hogy egy-egy jellemző állandóvá tétele mellett a további metrikák milyen irányban és mértékben változnak meg. A téma további kiterjesztési lehetősége egy olyan spektrális teljesítményeloszlás modell, amely

a nyitóáram és a lapkahőmérséklet mellett bemeneti paraméterként figyelembe veszi a LED eltelt üzemidejét és ezáltal az eszköz öregedését is.

Az általam elvégzett és későbbiekben tervezett munka közvetlenül hasznosulásra kerülhet a tanszéken folyó kutatásokban és a jelenleg is futó *AI-Twilight H2020-ECSEL projektben* (ID: 101007319). Az eredményeimet a konzulenseimmel közösen tervezzük publikálni, a következő *Világítástechnikai Évkönyvben*, az *Elektrotechnika* folyóiratban, a *2023-as LED konferencián*, a *2023-as Lux et Color Vesprimiensis konferencián*, valamint a 2023-as Budapesten megrendezésre kerülő *THERMINIC nemzetközi konferencián*.

## **6 Köszönetnyilvánítás**

Szeretnék köszönetet nyilvánítani konzulenseimnek a TDK dolgozat megírásában nyújtott segítségért. Külön szeretném megköszönni dr. Hegedüs Jánosnak a rengeteg segítséget, konzultációt és türelmet.

Szeretném továbbá megköszönni dr. Poppe Andrásnak, dr. Hantos Gusztávnak és dr. Hegedüs Jánosnak és a BME Elektronikus Eszközök tanszékének a tanszéki munkába való betekintést, betanítást, lehetőséget és bizalmat.

# Irodalomjegyzék

- [1] E. Fred Schubert: *Light-emitting diodes*, 2nd edition, ISBN: 0-511-34476-7, Cambridge University Press, 2006
- [2] Schwarcz Péter (Tungsram, Senior Szakértő): "*Világítási és egyéb hálózatok – lehetőségek és kérdések*"  
Online szeminárium; 2022. május 16.
- [3] Nemzetközi Világítástechnikai Szótár, "*CIE S 017:2020 ILV: International Lighting Vocabulary*", 2nd edition, online elérhető:  
<https://cie.co.at/e-ilv>  
(Megtekintve: 2022. október 23.)
- [4] Arató András, Dr. Borsányi János, Eperjessy Mária, Dr. Lantos Tibor, Nagy János (főszerk.), Némethné Dr. Vidovszky Ágnes, Poppe Kornélné, Török Béla:  
"*Világítástechnikai Kislexikon*", Világítástechnikai Társaság, 2001
- [5] Dr. Ábrahám György, Dr. Wenzelné Gerőfy Klára, Dr. Antal Ákos, Dr. Kovács Gábor, "*Műszaki Optika*", egyetemi jegyzet, BME, Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék, online elérhető:  
[https://mogi.bme.hu/TAMOP/muszaki\\_optika/index.html](https://mogi.bme.hu/TAMOP/muszaki_optika/index.html)  
(Megtekintve: 2022. október 23.)
- [6] Wikipédia, A Szabad Enciklopédia: „*Fehér*”, online elérhető:  
<https://hu.wikipedia.org/wiki/Feh%C3%A9r>  
(Megtekintve: 2022. október 23.)
- [7] Dr. Urbin Ágnes, "*Chromatic discrimination thresholds in terms of chromatic adaptation*", doktori (Ph.D.) értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Pattantyús-Ábrahám Géza Gépészeti Tudományok Doktori Iskola, 2022
- [8] "*A CIE színmérő rendszer*", a BME MOGI tanszék egyetemi jegyzetének 4.11.1. al-álfejezete, online elérhető:  
[https://mogi.bme.hu/TAMOP/muszaki\\_optika/ch04.html#ch-IV.11.1](https://mogi.bme.hu/TAMOP/muszaki_optika/ch04.html#ch-IV.11.1)  
(Megtekintve: 2022. október 23.)
- [9] CIE 013.3-1995: "Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources", ISBN: 978 3 900734 57 2
- [10] Hegedüs János: "*A LED-ek fizikai működése és felépítése*", Függelék a doktori értekezéshez, online elérhető:  
[https://www.eet.bme.hu/~hegedus/disszertacio/LED\\_ek\\_mukodese\\_jegyzet.pdf](https://www.eet.bme.hu/~hegedus/disszertacio/LED_ek_mukodese_jegyzet.pdf)  
(Megtekintve: 2022. október 23.)

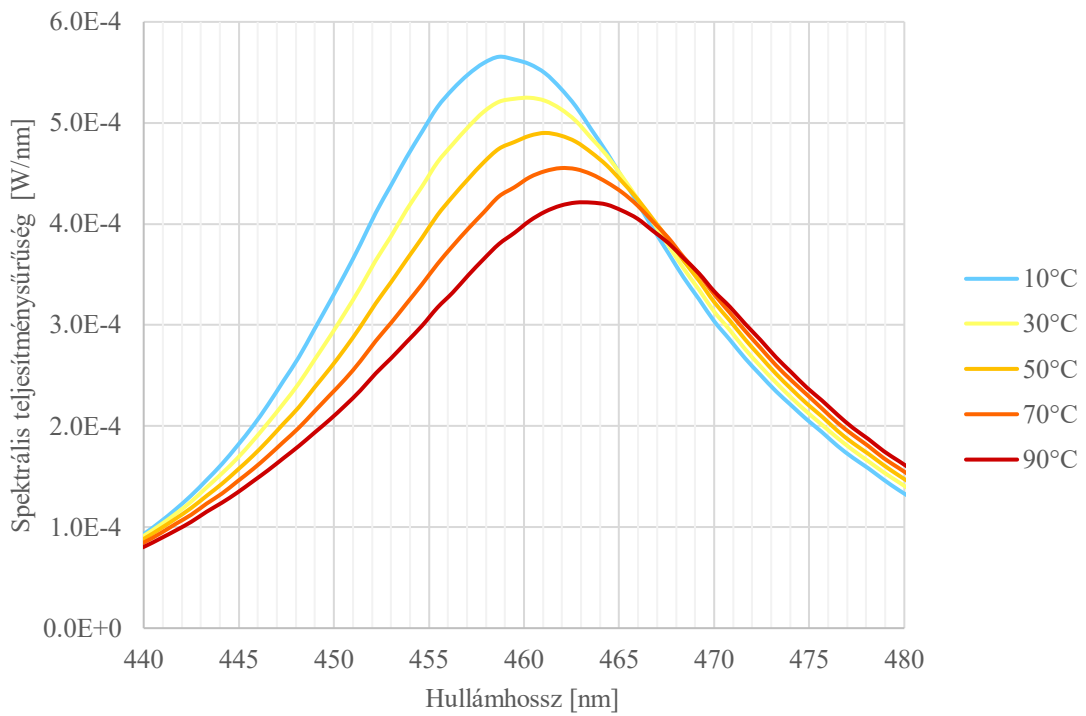
- [11] JEDEC JESD51-1 Standard "Integrated Circuit Thermal Measurement Method - Electrical Test Method" (1995), <https://www.jedec.org/standards-documents/docs/jesd-51-1>  
(Megtekintve: 2022. október 23.)
- [12] G. Hantos, J. Hegedus, "*K-factor calibration issues of high power LEDs*", In: Proc. of the 23rd THERMINIC Workshop, 27-29 September 2017, Amsterdam, Netherlands, pp. 182-187, DOI: 10.1109/THERMINIC.2017.8233798
- [13] G. Hantos, J. Hegedüs, A. Poppe, "*Different questions of today's LED thermal testing procedures*", In: Proc. of the 34th IEEE SEMI-THERM Symp., 19-23 March 2018, San Jose, USA, pp. 63-70, DOI: 10.1109/SEMI-THERM.2018.8357354
- [14] G. Hantos, "*Measurement techniques of light emitting diodes*", Doktori (PhD) értekezés, 2022, Budapest, <https://repozitorium.omikk.bme.hu/handle/10890/17001>  
(Megtekintve: 2022. október 23.)
- [15] T3Ster termikus tranziens mérő műszer: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/simcenter/t3ster.html>  
(Megtekintve: 2022. október 23.)
- [16] TeraLED kombinált LED karakterizáló eszköz: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/simcenter/tera-led.html>  
(Megtekintve: 2022. október 23.)
- [17] JEDEC JESD51-50 Standard: Overview of Methodologies for The Thermal Measurement of Single- and Multi-Chip, Single- and Multi-Pn-Junction Light-Emitting Diodes (LEDs), <https://www.jedec.org/standards-documents/docs/jesd51-50>  
(Megtekintve: 2022. október 23.)
- [18] JEDEC JESD51-51 Standard: Implementation of The Electrical Test Method for The Measurement of Real Thermal Resistance and Impedance Of Light-Emitting Diodes with Exposed Cooling Surface, <https://www.jedec.org/standards-documents/docs/jesd51-51>  
(Megtekintve: 2022. október 23.)
- [19] JEDEC JESD51-52 Standard: *Guidelines For Combining CIE 127-2007 Total Flux Measurements with Thermal Measurements of Leds with Exposed Cooling Surface*, <https://www.jedec.org/standards-documents/docs/jesd51-52>  
(Megtekintve: 2022. október 23.)
- [20] JEDEC JESD51-53 Standard: *Terms, Definitions and Units Glossary for Led Thermal Testing*, <https://www.jedec.org/standards-documents/docs/jesd51-53>  
(Megtekintve: 2022. október 23.)

- [21] CIE 127:2007 Technical Report: *Measurements of LEDs*,  
<https://cie.co.at/publications/measurement-leds>  
 (Megtekintve: 2022. október 23.)
- [22] CIE 225:2017 Technical Report: *Optical Measurement of High-Power LEDs*,  
<https://cie.co.at/publications/optical-measurement-high-power-leds>  
 (Megtekintve: 2022. október 23.)
- [23] Poppe A., "Teljesítmény LED-ek új termikus mérési szabványai", In: Barkóczi G., Bolvári G., Dr Szabó F. (szerk.), Világítástechnikai Évkönyv 2012-2013: A fény és élettani hatásai, 208 p. Budapest: MEE Világítás-technikai Társaság, 2012. pp. 96-102, <http://www.vilagitas.org/stuff/evkonyv/2012-2013/Led/Poppe%20Andras%20-%20Teljesitmeny%20LED-ek%20uj%20termikus%20meresi%20szabvanyai.pdf>  
 (Megtekintve: 2022. október 23.)
- [24] Poppe András, "Félvezető eszközök multi-domain karakterizációja", Akadémiai doktori értekezés, 2017 szeptember, Budapest, <http://real-d.mtak.hu/id/eprint/1053>  
 (Megtekintve: 2022. október 23.)
- [25] CAS 140 spektrométer:  
<https://www.instrumentsystems.com/en/products/spectrometers>  
 (Megtekintve: 2022. október 23.)
- [26] A. Poppe, G. Farkas, L. Gaál, G. Hantos, J. Hegedüs, M. Rencz, "Multi-domain modelling of LEDs for supporting virtual prototyping of luminaires", ENERGIES, 2019, 12(10), 1909, DOI:10.3390/en12101909
- [27] Genevieve, Martin; András, Poppe; Sebastian, Schoeps; Elke, Kraker; Christophe, Marty; Wouter, Soer; Joan, Yu, "AI-TWILIGHT: AI-digital TWIn for LIGHTing – a new European project", In: Vadim, Tsoi; Lorenzo, Codecasa; Bernhard, Wunderle (szerk.) Proceedings of the 27th International Workshop on THERMal INvestigations of ICs and Systems (THERMINIC'21 online), Piscataway (NJ), Amerikai Egyesült Államok : IEEE (2021) pp. 212-217. , 6 p.
- [28] J. Hegedüs, G. Hantos, A. Poppe, "Lifetime Modelling Issues of Power Light Emitting Diodes", ENERGIES, 2020, 13(13), 3370, DOI:10.3390/en13133370
- [29] Frank Reifgerste, Jens Lienig: "Modelling of the Temperature and Current Dependence of LED Spectra", 2008
- [30] Y. Uchida and T. Taguchi, Opt. Eng. 44, 124003 (2005)
- [31] S. Chhajed, Y. Xi, Y.-L. Li, T. Gessman, and E. F. Schubert, J. Appl. Phys. 97, 054506 (2005)
- [32] A. Keppens, W. R. Ryckaert, G. Deconinck, and P. Hanselaer , "Modeling high power light-emitting diode spectra and their variation with junction temperature", Journal of Applied Physics 108, 043104 (2010),  
<https://doi.org/10.1063/1.3463411>  
 (Megtekintve: 2022. október 23.)

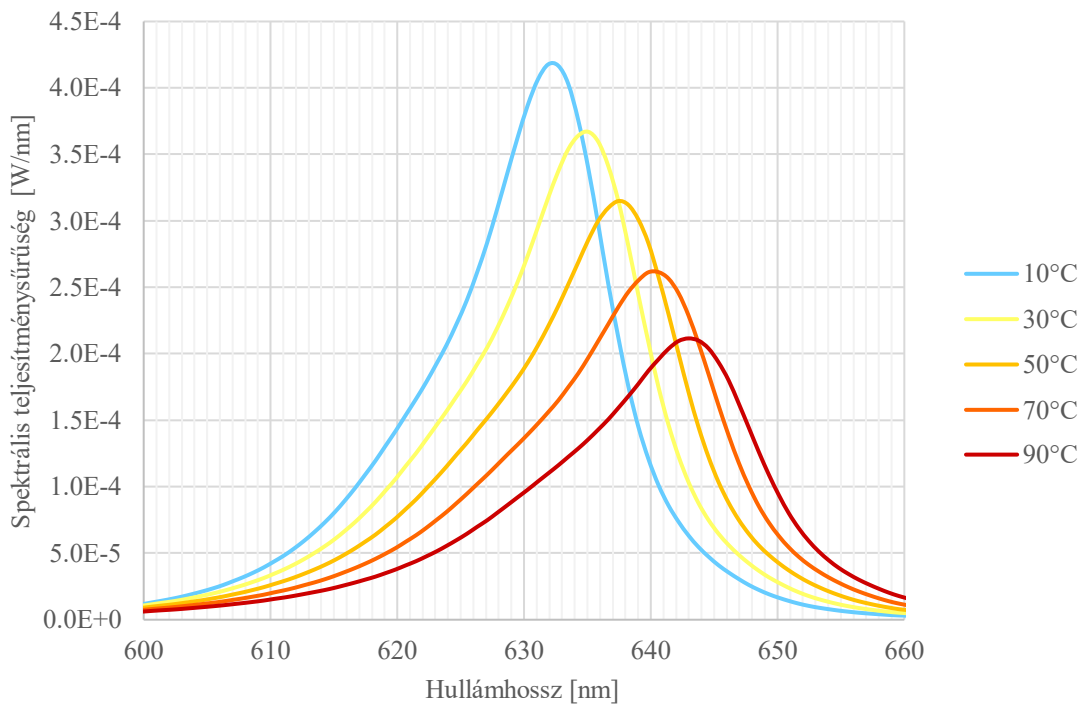
- [33] A. Keppens, "*Modeling and evaluation of high-power light-emitting diodes for general lighting*", Doctoral thesis, D/2010/7515/9, Katholieke Universiteit Leuven, ISBN: 978-94-6018-256-3, <https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/274568/1/PhD+text+AK.pdf> (legutóbbi hozzáférés: 2020. márc. 20.)
- [34] Yoshihiro Ohno "Spectral design considerations for white LED color rendering" *Optical Engineering* 44(11), 111302 (1 November 2005). <https://doi.org/10.1117/1.2130694> (Megtekintve: 2022. október 23.)
- [35] P. Dupuis, E. Purwanto, N. I. Sinisuka and G. Zissis, "*LED spectrum optimal modelization*" 2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 2018, pp. 1-12, doi: 10.1109/IAS.2018.8544471.
- [36] Benkner, Simon & Herzog, Alexander & Klir, Stefan & Driel, Willem & Khanh, Tran. (2022). "*Advancements In Spectral Power Distribution Modeling Of Light-Emitting Diodes.*", IEEE Access. 10. 1-1. 10.1109/ACCESS.2022.3197280.
- [37] Technical note, "*Chromaticity Difference Specification for Light Sources*" CIE TN 001:2014



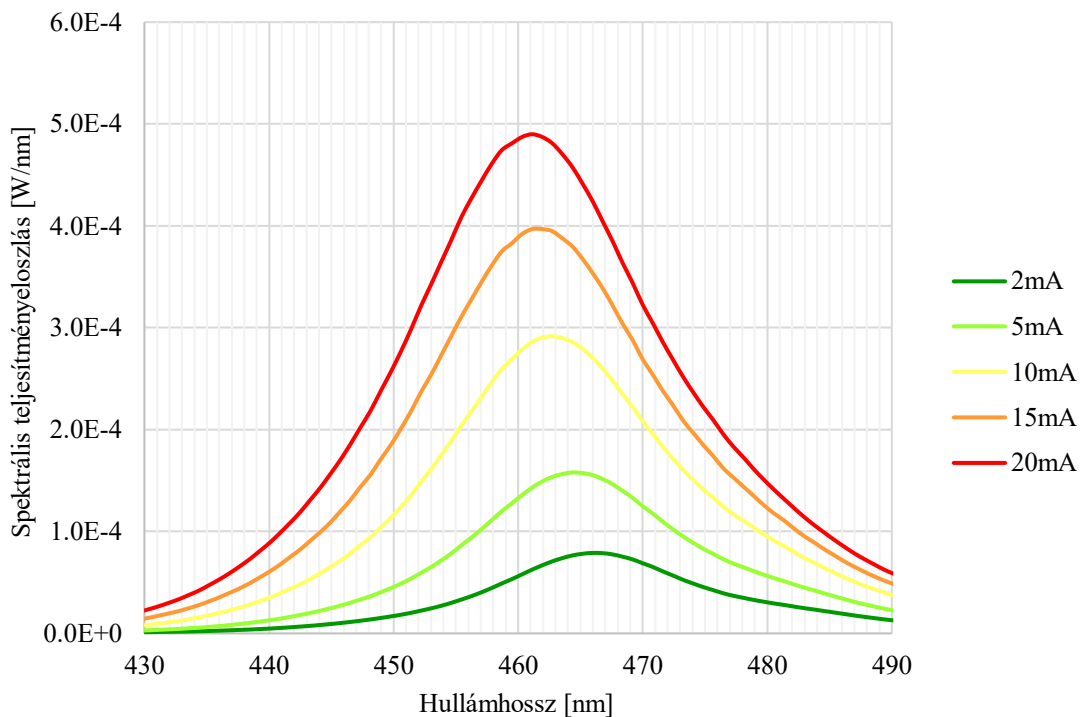
## Függelék



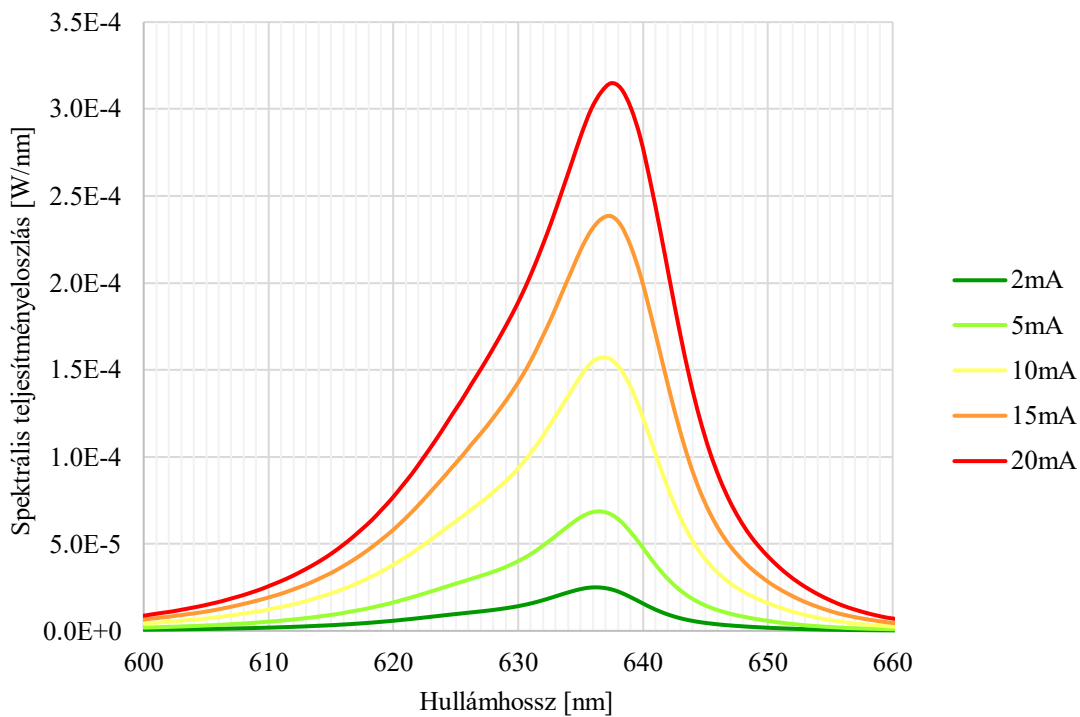
**Kék LED minta különböző referencia hőmérsékleteken mért spektrális teljesítményeloszlása**



**Piros LED minta különböző referencia hőmérsékleteken mért spektrális teljesítményeloszlása**



**Kék LED minta különböző nyitóáramokon mért spektrális teljesítményeloszlása**



**Piros LED minta különböző nyitóáramokon mért spektrális teljesítményeloszlása**