

GENOMGÅNG AV ANSI/IES TM-30-20

Detta dokument är finansierat av Energimyndighetens forskningsprogram EELYS
– Energieffektivitet inom belysningsområdet och framtaget i samarbete med:



EESU

Energieffektiv scen- och
utställningsbelysning

Det här dokumentet är en fristående del i en samling av fyra dokument:

1. Kravställning för LED-armaturer
2. Appendix
3. Ljusordlista för scen och utställningsbelysning
4. Genomgång av ANSI/IES TM-30-20



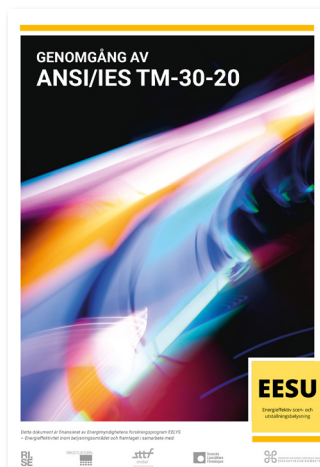
1. Kravställning



2. Appendix



3. Ljusordlista



4. ANSI/IES TM-30-20



Detta dokument är finansierat av Energimyndighetens forskningsprogram EELYS – Energieffektivitet inom belysningsområdet.

Projektgruppen

Jesper Cederlund, Riksantikvarieämbetet
Dag Engström, Riksteatern
Nina Mylly, RISE Research institutes of Sweden
Per Olof Hedekvist, RISE Research institutes of Sweden

Omslagsbild, Bruno Thethe/Unsplash

Innehåll

Bakgrund	4
Att använda TM-30	5
99 Färgutvärderingsprover (CES)	6
Korrelerad färgtemperatur (CCT)	6
Exempel på TM-30 Rapport	7
TM-30 färgvektorgrafik uppbyggnad	8
Nedbrytning av rapporten	9
A. Spektralfördelning	9
B. Färgåtergivningindex R_f	9
C. Gamutindex R_g	10
D. Lokal Mättnads/Kulörthetsförskjutning $R_{cs, hj}$	10
E. Lokal Färg/Kulörtonsförskjutning $R_{hs, hj}$	10
F. Lokal Färgfidelitet $R_{f, hj}$	11
G. Referensinformation	11
Förhållande Fidelitet R_f mot övriga värden	12
Hur avläser man TM-30 grafik?	12
TM-30-20 appendix E & F	14
Slutord	15

ANSI/IES TM-30-20

ANSI/IES TM-30-20 *Technical Memorandum-30 (TM-30)* är ett beräkningsramverk för utvärdering av färgåtergivningsprestanda. Ramverket har tagits fram av det amerikanska belysnings-sällskapet IES, Illuminating Engineering Society of North America, i samarbete med ANSI, American National Standards Institute.

Alla begrepp som används i den här sammanfattningen finns förklarade i EESU ordlista för scen och utställningsbelysning och i EESU appendix för scen och utställningsbelysning.

Bakgrund

Utgångspunkten när man jobbar med ljus, och varför dessa mätningar behövs, är att man ofta strävar efter ett ljus som återger alla färger så naturtroget som möjligt. Solen som referens återger alla för ögat synliga färger till 100%. Efter att glödljuset fasats ut går det inte att utgå från att vita ljuskällor återger alla färger fullt ut. Detta kan vara bra att ha med sig som bakgrund.

Utbudet av halvledarljuskällor ökade under 2000-talet, framför allt LED och för att kunna utnyttja LED:s hela potential och stora spektrala mångfald, krävs en utökad specifikationsram. Inom IES Color Committee har man under 2010-talet iakttagit en kraftig ökning av antalet forskningsprojekt och vetenskapliga artiklar som berör färgåtergivning. Behovet från tillverkare och användare av halvledarljuskällor krävde bättre, fler och mer exakta data.

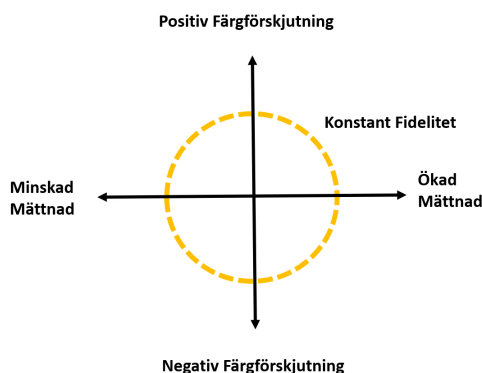
En mängd problem hade observerats med CRI Ra (*Colour Rendering Index*) som är den vanligaste metoden för att mäta färgåtergivning. Bland annat bristfälliga och föråldrade beräkningsgrunder som inte uppdaterats i enlighet med nya rön inom färgvetenskap. Det enda mått som angivits är en ljuskällas färgåtergivningsindex, eller *Fidelitet* vilket är ett trubbigt mått för att kunna rangordna ljuskällors färgåtergivningsegenskaper på ett korrekt sätt.

Fidelitet (*Fidelity*) är medelvärdet för hur en uppsättning färgprover återges av en ljuskälla i jämförelse med en referensljuskälla och säger inget om vilka färger som skiljer sig åt, eller på vilket sätt. CRI Ra-metoden som består av åtta medelmättade och bleka pastellfärger kan kompletteras med sex mättade kulörer som tagits fram för att bilda CRI Re (*e står för extended*) i ett försök att få bättre information om färgåtergivningsprestandan. Men detta ger fortfarande endast ett medelvärde av ett mindre antal färger.



Figur 1 Referensfärgerna inom CRI Ra och Re. CC-BY Mattias Fransson.

Medelvärdet av färgåtergivningen speglar alltså inte hur återgivning av olika färger varierar eller skiljer mellan önskade och oönskade färgförändringar. Såsom ökad och minskad mättnad, positiv och negativ färgförskjutning. Endast storleken på färgskillnaden, inte hur olika färgerna är.



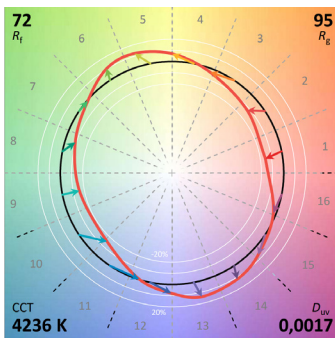
Figur 2 Cirkeln visar hur mättnad och färgförskjutning förhåller sig till Fidelitet. CC-BY Dag Engström.

2013 tog ANSI och IES beslut om att starta arbetet med en ny standard och en arbetsgrupp tillsattes. Utgångspunkten var att det fanns ett behov av att sammanföra relaterade forskningsinsatser och befintliga idéer till ett system för specificering och klassificering av färgåtergivningens prestanda. Man sammanställde all tillgänglig ny och äldre forskning inom färgvetenskapen och berörda discipliner, vilka togs i beaktande. 2015 kunde arbetsgruppen presentera IES TM-30-15 som kan ersätta och komplettera CRI med fler data. CIE:s (*International commission of illumination*) standard CIE 224:2017 använder samma färgåtergivningsindex med 99 färger som TM-30.

Arbetet med TM-30 är pågående och uppdateringar sker löpande, den senaste gällande uppdateringen är TM-30-20.

Att använda TM-30

TM-30 är ett beräkningsramverk, där man matar in spektrometriska data för en ljuskälla och får ut grafiska och numeriska tabeller över en mängd kolorimetriska data.



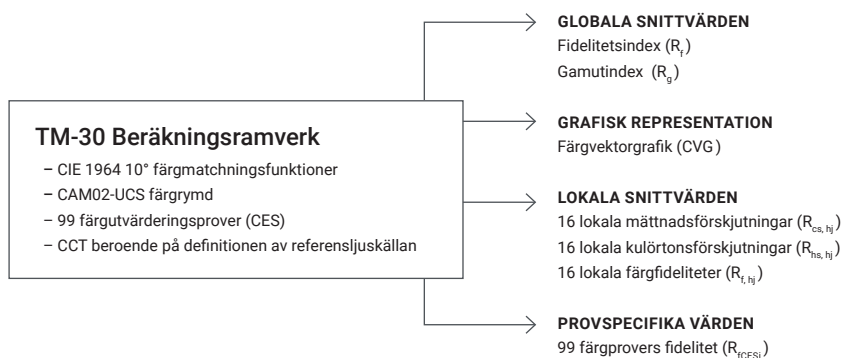
Figur 3 TM-30-färgvektorgrafik.

TM-30 har förutom en fidelitetsindex R_f på 99 färger (*till skillnad på CRI's 8 eller 15 färger*) även beräkning av Gamut R_g mättnadsförskjutning R_{cs, h_j} och färgförskjutning R_{bs, h_j}

Det system som används i TM-30 består av tre huvudsakliga delar:

1. En standardiserad modell av genomsnittligt mänskligt färgseende.
2. En uppsättning standardiserade färgprover; dessa kan vara fysiskt existerande eller teoretiska matematiska koordinater i en färgrymd.
3. Ett system för att definiera en eller flera referensljuskällor som en viss testljuskälla kan jämföras med.

På så sätt kan färgåtergivning bestämmas rent matematiskt, även om det är en förenkling av en mer komplex fråga.



Figur 4 Grafiken ovan visar schematiskt hur TM-30 är uppbyggt.

10° avser den skarpa delen av det mänskliga ögats synfält, på en armlängds avstånd, en cirkel på ca 10 cm. Färgrymden CAM02-USC, publicerad av CIE (*International commission of illumination*), är baserad på de färger ett genomsnittligt mänskligt öga kan urskilja.

Fidelitetsindex*
Gamut*
Färgförskjutning*
Färgrymd och homogen färgrymd*

* Se EESU ljusordlista för scen och utställningsbelysning samt appendix.

Spektralreflektans

Mätning av det ljus som reflekteras från en färgad yta.

99 färgutvärderingsprover (CES)

De 99 färgutvärderingsproverna (CES) är spektralreflektansfunktioner* för existerande objekt som till exempel grönsaker, frukter, välkända läskburkar, m.m. och utvecklades speciellt för TM-30 från mer än 100 000 objektspektrala reflektansmätningar, som tidigare dokumenterats i vetenskaplig litteratur.



Figur 5 99 färgutvärderingsprover (CES).

Dessa färgprover, eller delmängder av dem, används vid beräkning av alla mått som ingår i TM-30. Dessa standardiserade färgprover möjliggör konsekventa och effektiva förutsägelser om hur en ljuskälla kommer att påverka färgutseendet i en riktig miljö.

Korrelerad färgtemperatur (CCT)

CCT**

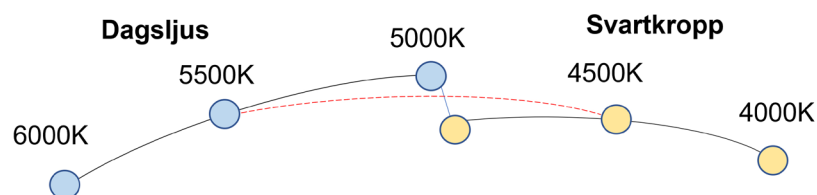
Kelvin*

**CIE Daylight illuminant

En serie av standardiserade referensljuskällor för dagsljus definierade av CIE.

Den korrelerade färgtemperaturen, CCT (T_c) beror på definitionen av referensljuskällan.

- $T_c \leq 4000\text{K}$ (Kelvin) Svartkropp
- $4000\text{K} < T_c < 5000\text{K}$, 50/50 Svartkropp/Dagsljus (CIE Daylight illuminant**)
- $T_c \geq 5000\text{K}$ Dagsljus (CIE Daylight illuminant**)

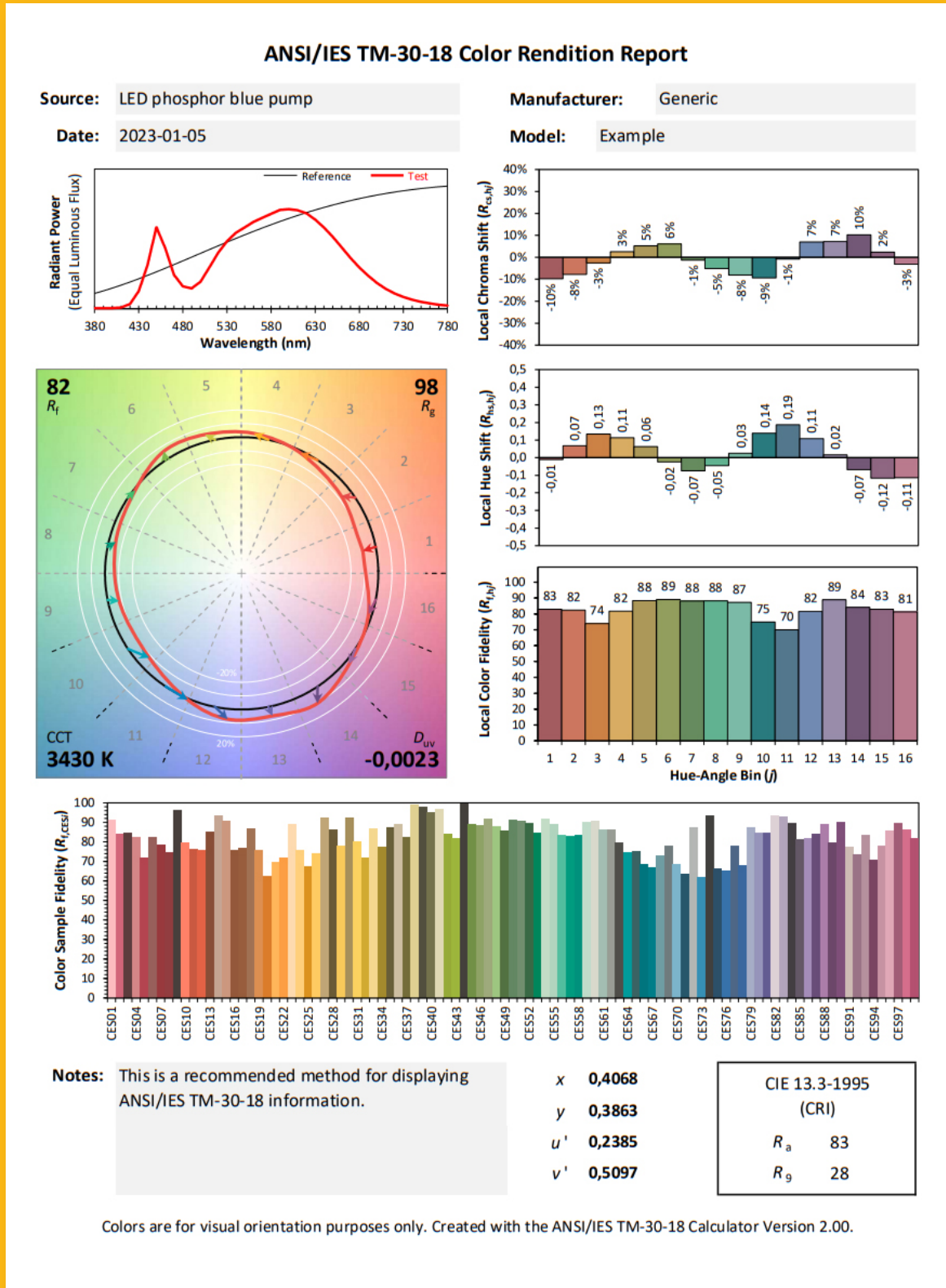


Figur 6 Beräkningsramverket TM-30 innehåller en interpolering mellan dagsljusreferens och svartkroppreferens för att få en mjukare övergång mellan referensljuskällorna, streckad röd linje.

* Se EESU ljusordlista för scen och utställningsbelysning samt appendix.

Exempel på TM-30-rapport

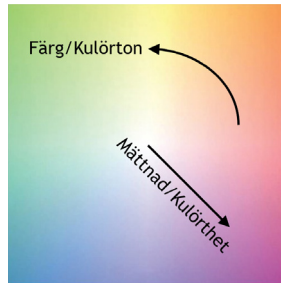
En TM-30-rapport kan se ut som nedan:



Figur 7 Exempel på en TM-30-rapport.

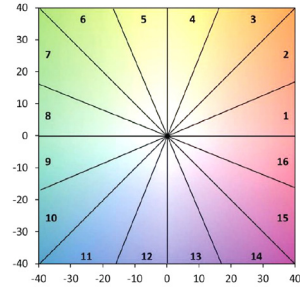
TM-30-färgvektorgrafik uppbyggnad

Färgrymd och homogen färgrymd*



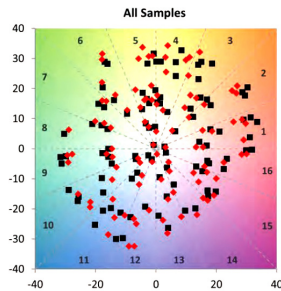
Figur 8 Den grafiska modellen i TM-30 består av en schematisk bild av färgrymden CAM02-USC.

Bin - kulörtonsfack*

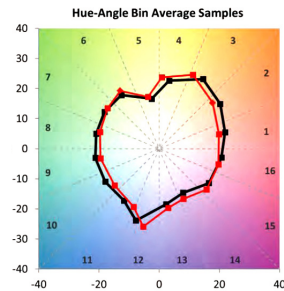


Figur 9 Färgbakgrunden delas sedan in i 16 Kulörtonsfack på 22,5°, numrerade moturs. (Hue Angle Bins)

Nedan visas hur återgivningen av de 99 färgutvärderingsproverna CES fördelar sig över färgrymden; rött är testljuskällan, svart är referensljuskällan. I figuren till höger visas genomsnittet per kulörtonsfack.



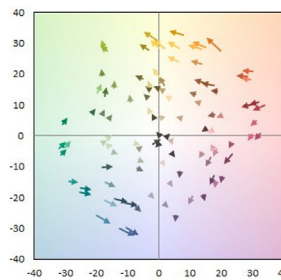
Figur 10 Färgåtergivningen av de 99 färgutvärderingsproverna CES fördelat över färgrymden; Röda prickar är testljuskällan och de svarta referensljuskällan.



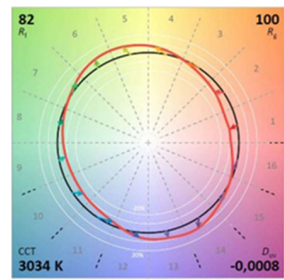
Figur 11 Genomsnittet per kulörtonsfack.

Färg/kulörtonsförskjutning*

Mättnads-, och färgskiftningar kan visas grafiskt som vektorer i färgrymden till vänster, där starten på pilarna är hur färgproverna (CES) återges av referensljuskällan och pilens spets är hur de återges av testljuskällan. Radiell (centrum och ut/in) riktning är mättnadsförskjutning och tangentiell (följer cirkelns utsida) riktning är färg/kulörtonsförskjutning.



Figur 12 Mättnads-, och färgskiftningar kan visas grafiskt som vektorer* i färgrymden, där starten på pilarna är hur färgproverna (CES) återges av referensljuskällan och pilens spets är hur de återges av testljuskällan.



Figur 13 Radiell (centrum och ut/in) riktning är mättnadsförskjutning och tangentiell (följer cirkelns utsida) riktning är färg/kulörtonsförskjutning.

**En vektor är en storhet som består av både en storlek och en riktning.

Gamut*

D_{uv} *

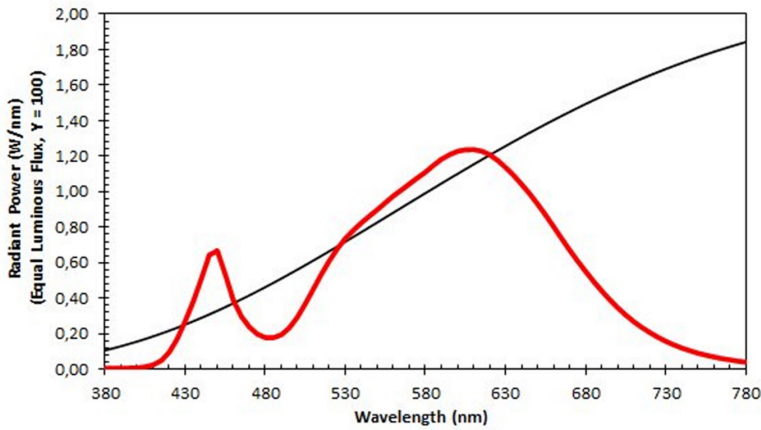
*Se EESU ljusordlista för scen och utställningsbelysning samt appendix.

Figuren ovan till höger visar den slutliga TM-30-grafiken, där referensljuskällans gamutyta har normaliserats till en cirkel och vektorerna visas som genomsnitt per kulörtonsfack. I grafiken visas även numerisk fidelitet R_f gamut R_g CCT och D_{uv} (ett mått på ljuskällans grön/gul-magenta-stick). Måtten visas även som numeriska värden i stapeldiagram.

Nedbrytning av rapporten

De olika delarna av rapporten består av:

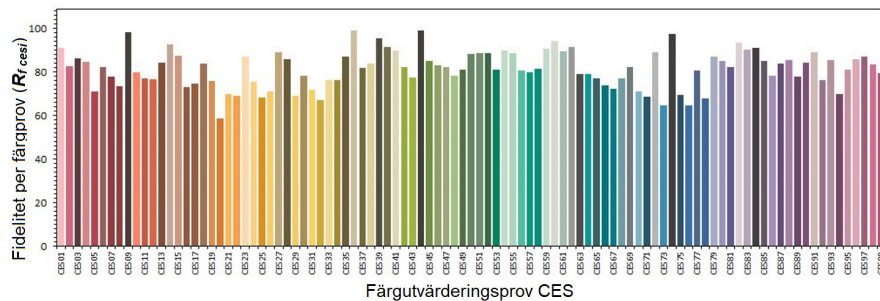
A. Spektralfördelning



Figur 14 Hur energin från ljuskällan fördelar sig över våglängderna i det synliga spektrumet.

Detta är vad man normalt mäter med en spektrometer och TM-30-ramverket räknar utifrån detta ut ett antal mått på färgåtergivningsdata.

B. Färgåtergivningsindex R_f Fidelity Index (motsvarar CRI)

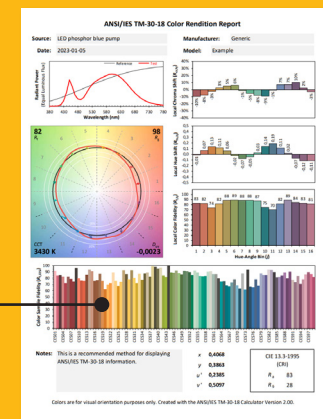
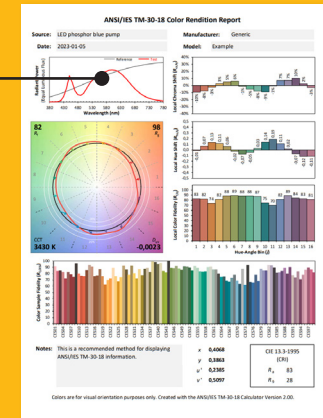


Figur 15 Återgivning av de 99 referensfärgerna som stapeldiagram.

R_f Fidelitet

Den genomsnittliga avvikelsen i färgåtergivning mellan testljuskällan och referensljuskällan i procent. Det indikerar bara skillnadens storlek och innehåller ingen information om specifika kulörtoner (färger).

Högre är närmare referensljuskällan, vilket kanske inte nödvändigtvis är bättre för den avsedda applikationen. Max 100, typiska värden 60 – 100.



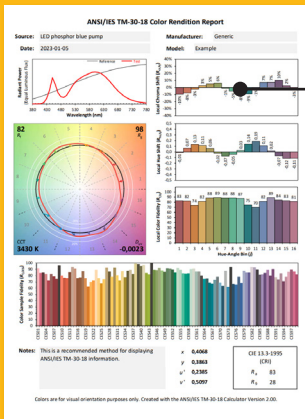
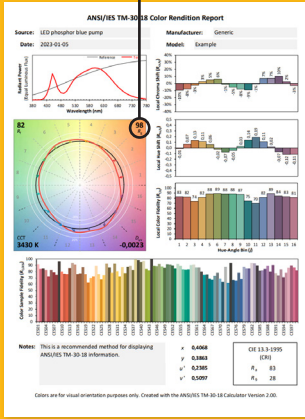
C. Gamutindex R_g

R_g Gamutindex (Anges numeriskt)

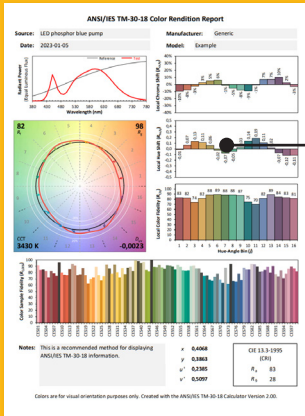
Genomsnittlig ökning eller minskning av kulörthet/mättnad, i förhållande till referensljuskällan, i procent. Innehåller ingen information om specifika kulörtoner (färger).

Värden över 100 är lika med ökad mättnad.

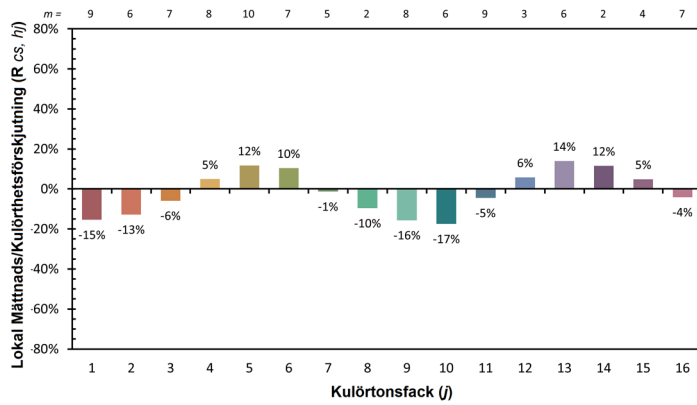
Värden under 100 är lika med minskad mättnad. Intervall 0–150, typiska värden 80–120.



Kulörthetsförskjutning*



D. Lokal Mättnads/Kulörthetsförskjutning $R_{cs, hj}$ (Local Chroma Shift)



Figur 17 Indikerar den specifika ökningen eller minskningen av mättnad/kulörthet, i förhållande till källans referensbelysning, för ett specifikt Kulörtonsfack (Hue Angle Bin).

Kulörtonsfack 1–16 (j) (Bokstaven j är variabel, t.ex. $R_{cs, b1}$ eller $R_{cs, b8}$ o.s.v.).

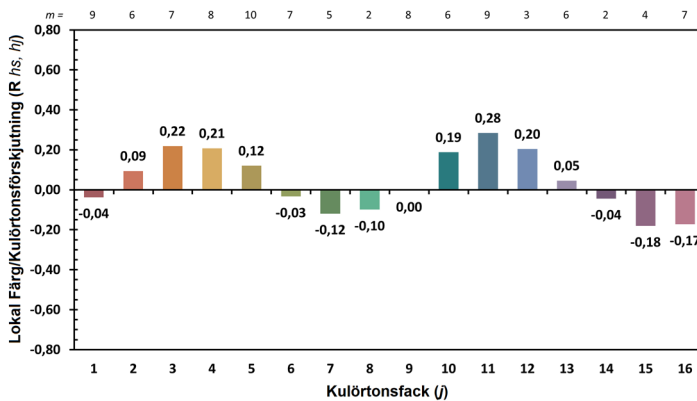
Värden över 0%, ökad mättnad

Värden under 0%, minskad mättnad

Intervall -95% – 85%

Typiska -20% – 20%

E. Lokal Färg/Kulörtonsförskjutning $R_{hs, hj}$ (Local Hue Shift)



Figur 18 Indikerar den specifika förskjutningen av kulörtonen, i förhållande till källans referensbelysning, för ett specifikt Kulörtonsfack (Hue Angle Bin).

Kulörtonsfack 1–16 (j) (Bokstaven j är variabel, t.ex. $R_{hs, b1}$ eller $R_{hs, b4}$ o.s.v.).

Värden över 0, positiv färgförskjutning.

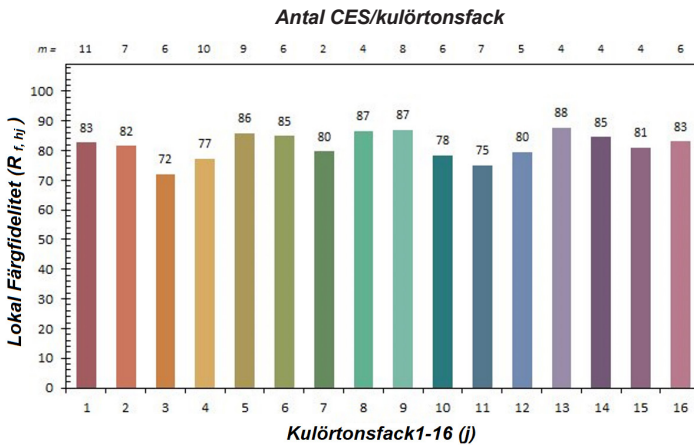
Värden under 0, negativ färgförskjutning.

Intervall -0.5 – 0.5.

Typiska -0.2 – 0.2

*Se EESU ljusordlista för scen och utställningsbelysning samt appendix.

F. Lokal Färgfidelitet $R_{f, hj}$ (Local Fidelity)

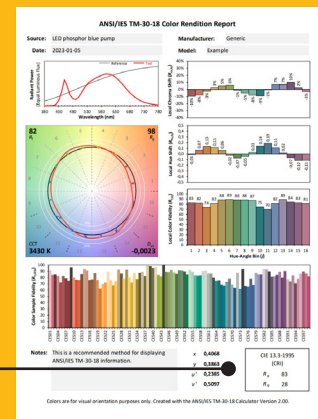
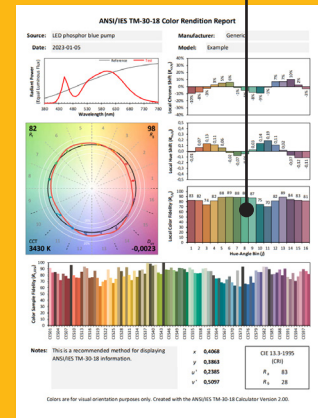


Figur 19 Indikerar den specifika storleken för avvikelse, i förhållande till källans referensbelysning. Anger inte nyans eller mättnad. Siffrorna ovanpå ramen visar hur många av de 99 CES som fördelas över varje kulörtonsfack. Detta varierar med ljuskällans färgtemperatur.

$R_{f, bj}$ = Röda nyanser, kulörtonsfack1 (Bokstaven j är variabel, t.ex. $R_{f, b1}$ eller $R_{f, b12}$ o.s.v.).
 Max =100
 Typiska 60–100

G. Referensinformation

Längst ned på rapporten redovisas ljuskällans kromaticitetkoordinater; x,y för CIE1931xy, respektive u', v' för CIELUV. Som referens visas CRI och R9 (enligt CIE13.3-1995) i rutan längst ned.

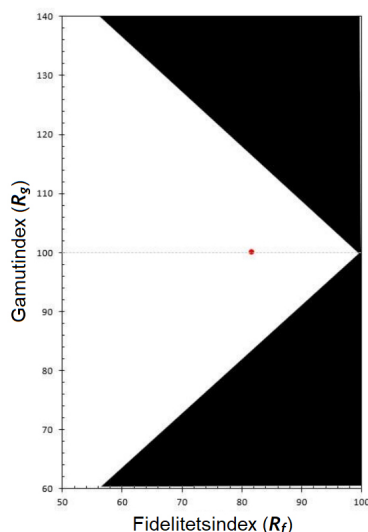


Kromaticitetskoordinater*
 CIELUV*
 CRI Ra*

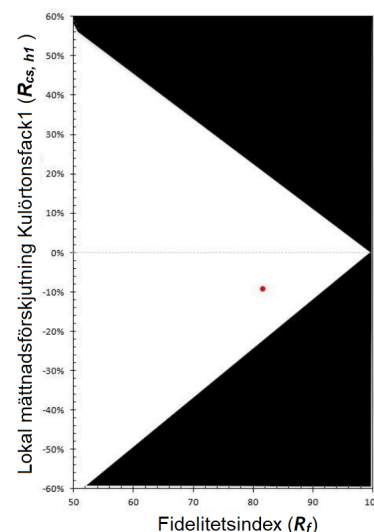
* Se EESU ljusordlista för scen och utställningsbelysning.

Förhållande Fidelitet R_f mot övriga värden

I grafiken nedan visas hur förhållandet mellan fidelitet R_f mot Gamut index R_g och fidelitet mot mättnadsförskjutning $R_{cs,hl}$ förhåller sig. Svarta områden är omöjliga värden. Det vill säga; vid $R_f = 100$ kan inte gamut R_g vara annat än 100, eller $R_{cs,hl}$ vara annat än 0, men ju lägre R_f ju mer kan R_g eller $R_{cs,hl}$ variera. Till exempel: Vid $R_f = 70$ kan Gamut R_g variera mellan 63-127.



Figur 20 Området för möjliga R_g värden ökar när R_f minskar. CC-BY Dag Engström.

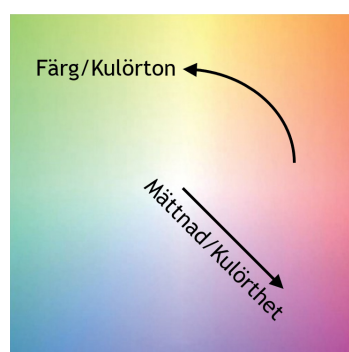


Figur 21 Området för möjliga $R_{cs,hl}$ värden ökar när R_f minskar. CC-BY Dag Engström.

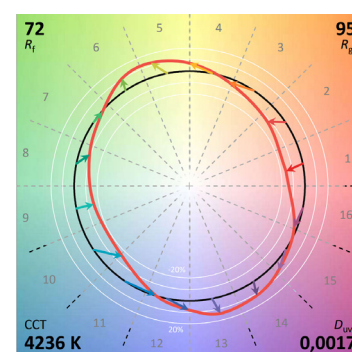
Hur avläser man TM-30-grafik?

När testljuskällans gamutkurva (röd) går utanför testljuskällans cirkel (svart), visar detta på ökad mättnad för detta område och när den går innanför visar det på minskad mättnad.

Om vektorerna (pilarna) pekar rakt ut eller in mot centrum finns det ingen färgförskjutning, men om dom lutar mot cirkels periferi, är färgen/kulörtonen förskjuten. Medurs är negativ, moturs positiv.

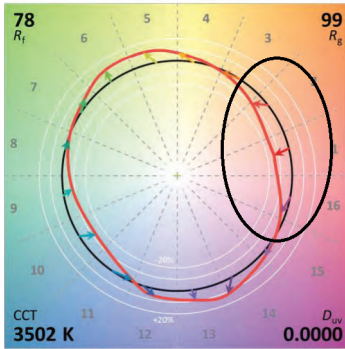


Figur 22 Den grafiska modellen i TM-30 består av en schematisk bild av färgrymden CAM02-USC.

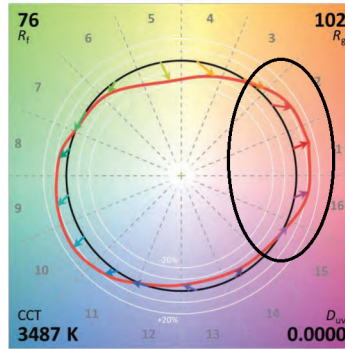


Figur 23 TM-30-färgvektorgrafik.

I figur 24 och 25 visas två ljuskällor med liknande CCT, R_f och R_g men väldigt olika gamutkurva (röd). Dessa ljuskällor kommer att upplevas se helt olika ut, den vänstra lite kallare, den högra lite varmare, trots att de har lika genomsnittsvärden.



Figur 24 Ljuskällan har minskad mätttnad i det röda området (kulörtonsfack 1,2).



Figur 25 Ljuskällan har ökad mätttnad i det röda området (kulörtonsfack 1,2).

Som vi ser på (figurerna 20 och 21), så kan gamut R_g variera en hel del vid ett färgåtergivningsindex R_f under 80, vilket båda dessa ljuskällor har.

Viktigt att beakta är de 99 färgprovernas fördelning (figur 19) över kulörtonsfacken (Hue Bins), varierar beroende på referenskällans färgtemperatur.

TM-30-20 appendix E och F

Det finns ett utvärderingshjälpmedel som erbjuds i TM-30-20, nämligen appendix E och F. Hjälpmittlet utgörs av en matris med 3 x 3 rutor. Horisontellt redovisar man designintentionen – syftet:

$R_{cs, h1}$ syftar till lokal mättnadsförskjutning, kulörtonsfack 1

		Designintention (Den önskade effekten av färgåtergivning på den upplysta miljön)						
		Preferens (P) Preference (P)	Livfullhet (V) Vividness (V)	Fidelitet (F) Fidelity (F)				
Prioriteringsnivå	1	P1	Rf ≥ 78 Rg ≥ 95 -1% ≤ Rcs, h1 ≤ 15%	V1	Rg ≥ 118 Rcs, h1 ≥ 15%	F1	Rf ≥ 95	
		2	P2	Rf ≥ 75 Rg ≥ 92 -7% ≤ Rcs, h1 ≤ 19%	V2	Rg ≥ 110 Rcs, h1 ≥ 6%	F2	Rf ≥ 90 Rf, h1 ≥ 90
			P3	Rf ≥ 70 Rg ≥ 89 -12% ≤ Rcs, h1 ≤ 23%	V3	Rg ≥ 100 Rcs, h1 ≥ 0%	F3	Rf ≥ 85 Rf, h1 ≥ 85

Tabellanteckning: Alla kriterier förutsätter en polykromatisk miljö med en genomsnittlig horisontell belysningsstyrka mellan 200 och 700 lux och enhetlig kromaticitet.

Figur 26 Alla kriterier förutsätter en polykromatisk miljö med en genomsnittlig horisontell belysningsstyrka mellan 200 och 700 lux och enhetlig kromaticitet.

Färgpreferens/Preference (P) Avsikt att skapa en behaglig miljö som ser naturlig ut. Färgpreferens kan vara den dominerande avsikten med färgåtergivning i detaljhandeln, i kontors-, hotell- och bostadsbelysning samt vid scen- eller utställningsljussättning.

Livfullhet/ Vividness (V) Avsikt att skapa en livlig/mättad miljö, oavsett om det ser naturligt ut eller inte. Color Vividness kan vara den dominerande avsikten med färgåtergivning i specifika applikationer för underhållning, display eller detaljhandel.

Fidelitet/ Fidelity (F) Avsikt att uppnå ett naturtroget färgutseende, vid samma ljusstyrka som referensbelysningsmedlet. Fidelitet kan vara den dominerande avsikten med färgåtergivning i tillverkning, medicinsk färgmatchning eller färgåtergivning.

Varje designintention innehåller tre prioritetsnivåer – vertikalt, nivåerna 1–3, varav 1 är den högsta eller mest restriktiva som indikerar kriteriernas stringens. Högre nivåer ökar sannolikheten för att uppnå designens avsikt, medan lägre nivåer erbjuder flexibilitet för att ta hänsyn till andra överväganden, som till exempel energieffektivitet. Matrisen ovan visar de rekommenderade specifikationerna för färgåtergivning som först publicerades i bilaga E. Varje specifikation innehåller ett till tre mått. Alla mått har en nedre gräns, utom $R_{cs, h1}$ där man även lagt till en övre gräns i specifikationen för färgpreferens (P). På grund av sambandet mellan olika mått, är andra övre gränser underförstådda. För att uppfylla specifikationen måste alla kriterier i en cell vara uppfyllda. Prioritetsnivåerna inom en designintention är relaterade så att alla ljuskällor som uppfyller en specifikation med högre prioritetsnivå också uppfyller specifikationerna för den lägre prioritetsnivån för samma designintention.

Koderna som är associerade med varje avsikt, kan användas som ett produktklassificerings- och identifieringssystem, som skulle göra det möjligt för en konsument att välja mellan ett begränsat antal alternativ, samt identifikation av produkter som kan ersätta produkter man varit nöjd med. Koderna minskar behovet av att veta detaljerna bakom TM-30-utdata, där det finns begrepp som är lätta att missförstå.

Det är tillrådligt att en kod för alla tre designavsikterna presenteras; till exempel P3 V- F3 eller P1 V3 F-, så att en konsekvent och fullständig bild presenteras. De bör inte betraktas som en ersättning för numeriska data. Två ljuskällor med samma beteckning kan se olika ut, och de tre prioriteringsnivåerna är en relativt grov uppdelning.

Slutord

Det finns fler sätt att gå till väga för att underlätta arbetet med att bestämma vilka färgåtergivningsförmågor man vill eftersträva och vid val av belysningsarmatur är det väsentligt att man har gjort klart för sig vilket syftet eller designintentionen är.

I vissa fall kanske det, beroende på designern/brukarens erfarenheter, kan vara så enkelt att man vill ha fler armaturer av en sort som man provat tidigare, som fungerar bra och som man tycker om. I andra fall kan det vara så att man behöver gå mer systematiskt till väga. Då blir TM-30 och PVF ett värdefullt verktyg.

Man ska undvika att rangordna ljuskällors färgprestanda om de har väldigt olika korrelerad färgtemperatur, *CCT*, då dom har olika referensljuskällor. De uppdaterade vetenskapliga metoderna hos TM-30, ger dock konsekventa värden över ett brett urval av olika ljuskällor.

Man bör notera att i de 99 färgproverna ingår inga fluorescenser. Man ska även tänka på att bra färgåtergivning minskar ljuseffektiviteten. Ljuskällor med högt Lux/Watt förhållande, tenderar att vara smala i sitt spektrum; jämför till exempel *lågtrycksnatrium*^{**}. Den mest energieffektiva ljuskällan, skulle teoretiskt ha hela sitt spektrum vid 555 nm.

Är TM-30 något för alla? Man kan väl dra slutsatsen att det ändå krävs en del förkunskaper för att kunna ta till sig alla begrepp inom färgåtergivning men i vilket fall som helst, är *TM-30 färgåtergivningsindex*, R_f ett mer korrekt mått än det gamla *CRI*.

Men för den som arbetar professionellt med ljus och urval av ljuskällor, går *TM-30* inte att komma runt, dessutom kan många moderna ljusmätare presentera sina resultat som *TM-30*-data och grafik.

Vid pennan,
Dag Engström

***Lågtrycksnatrium – den klassiska gula motorvägsbelysningen.*

** Se EESU ljusordlista för scen och utställningsbelysning.*



*Detta dokument är finansierat av Energimyndighetens forskningsprogram EELYS
– Energieffektivitet inom belysningsområdet och framtaget i samarbete med:*

