

# Färgåtergivning: En berättelse om två parametrar

Mark S. Rea, \* Jean P. Freyssinier-Nova

Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY 12180

## Sammanfattning:

*Det var det bästa måttet på färgåtergivning, det var det sämsta måttet på färgåtergivning. Färgåtergivningsindex (CRI) är den mest vanliga parametern använd i belysningsindustrin för att representera färgåtergivningsegenskaperna hos elektriska ljuskällor. CRI var ämnat att karakterisera hur "sanna" eller "naturliga" objekt tedde sig när de belystes av en ljuskälla, men var aldrig ämnat att, t.ex., representera hur väl objektsfärger differentierade under en ljuskälla, vilket är ytterligare en viktig aspekt när det gäller färgåtergivning. Data presenterad här demonstrerar att CRI i kombination med en annan parameter av färgåtergivning, gamut area index (GAI), är användbart vid prognos av subjektiva omdömen om hur "naturliga" objekt ter sig och hur "livfulla" de ter sig, samt hur väl man kan skilja på subtila nyansskillnader. Inget av dessa mått kan dock på egen hand tänkas vara tillräckligt för att uppfylla alla krav på en ljuskälla att ge god färgåtergivning under alla omständigheter. Framtida forskning får utvisa om endast två mått är tillräckligt för att utlova god färgåtergivning från en ljuskälla och huruvida dessa två mätsätt (CRI och GAI) är de bästa för detta ändamål. Fram till dess bör CRI och GAI gemensamt användas och rekommenderas som praktiska, användbara och ömsesidigt förstärkande mått på färgåtergivning. Datan presenterad här demonstrerar även att total strålning (irradians) är viktigt för god färgåtergivning.*

*Nyckelord: Färgåtergivning; index; gamut area; fullspektrum; fluorescerande; LED; fosfor; korrelerad färgtemperatur; kall; varm; vitt; naturlighet; livfullhet; differentiering; Farnsworth*

## INTRODUKTION

P.J. Bouma beskrev 1947 de aspekter av dagsljus som gör det till en ideal belysningskälla. "Det (dagsljus) visar (1) en god spridning/bra utbud av färger, (2) gör det enkelt att särskilja svaga skiftningar och nyanser av färger, och (3) objektens färger runt omkring oss ser naturliga ut." Hans beskrivning är, de facto, ett uttryck för viktiga särdrag av färgåtergivning hos alla ljuskällor. Generellt sett så bör en ljuskälla med goda färgåtergivningsegenskaper, dagsljus eller elektrisk, visa ett komplett utbud av färger (t.ex. nyans, ljushet och mättnad), ge god färgdifferentiering mellan objekt av liknande spektral reflektion (t.ex. lila från vinröd) och skall inte förvränga färger (t.ex. skall inte över-intensifiera det röda utseendet i köttfärs).

I kontexten av Boumas tidiga beskrivning, bör färgåtergivning utvärderas på flera olika sätt eftersom det finns flera olika aspekter av färgåtergivning. För att tydliggöra detta ännu mer; färgåtergivning bör absolut aldrig mätas med endast en parameter. Inte desto mindre har vi för närvarande endast ett erkänt mått på färgåtergivning i belysningsbranschen, CRI\*, utvecklat under tidigt 1960-tal genom ett samarbetsprojekt mellan vetenskapsmän och tillverkare. De utvecklade CRI som ett mått på hur "sanna" objekten renderades av elektriska ljuskällor. De antog att dagsljus och glödljus skulle vara referenskällor i ett system för färgåtergivning eftersom de var de mest familjära ljuskällorna (i alla fall för boende i USA) och skulle därför rendera/återge objekt "verklighetstroget" och "naturligt". Det generella CRI-värdet på alla elektriska ljuskällor var definierat i termer av nettoförskjutningen i färgområdet hos åtta standard-reflektanser, till koordinaterna hos dessa standard-reflektanser under

referens-ljuskällan av samma motsvarande färgtemperatur (CCT). Den generella CRI-skalan var normaliserad till 100 för referensljuskällor och satt till 50 för en varmvit halogenfosfor lysrörslampa.

\*I syftet för denna rapport, används CRI synonymt med generell CRI.



Figur 1: Farnsworth-Munsell testprov i dagsljus (till vänster) och en vy in i apparaten som användes under studien (till höger).

Deras tanke var att eftersom dagsljus och glödlampeljus var de mest välbekanta ljuskällorna, fanns sambandet att ju större skiftning inom färgområdet för standardreflektanserna under testljuskällan, relativ till kromaticiteten under referenskällan, desto mindre "sanna" eller "naturliga" skulle objekten visas under denna ljuskälla.

Viktigt är även att de insåg gränserna för CRI, varje enskild mätning var inkapabel att beskriva färgåtergivningsegenskaper hos en ljuskälla. Judd, en av grundarna av CRI, utvecklade ett "smicker index" som svar på de inbyggda begränsningarna hos CRI att karakterisera färgåtergivning helt och hållet. Judd trodde att CRI kunde karakterisera hur "sanna" eller "naturliga" föremål visades, men inte kunde karakterisera hur "smickrande" eller "levande" föremål kan tyckas te sig, särskilt rodnad och mättnad av mänsklig hud. En annan viktig aspekt av färgåtergivning identifierad av Bouma, men bara sporadiskt övervägd, är förmågan hos en ljuskälla att avslöja subtila skillnader i spektral reflektans (t.ex. lila från vinröd). Thornton marknadsförde begreppet gamut-area som ett mått på "färg-differentiering." Detta koncept har inte omfamnat av belysningsbranschen men har utgjort en grund för bildskärmsindustrin eftersom det för dem är viktigt med en exakt återgivning av mättade färger. Intressant nog är gamut-arean också grunden för det moderna trifosfor-lysröret som utvecklades först av Thornton vid Westinghouse.

Med den snabba utvecklingen av solid state ljus teknik, finns det nu ett erkänt behov av att utveckla, förbättra, eller expandera CRI så att det på ett tillfredsställande vis omfattar alla aspekter av färgåtergivning beskrivna av Bouma 1947.

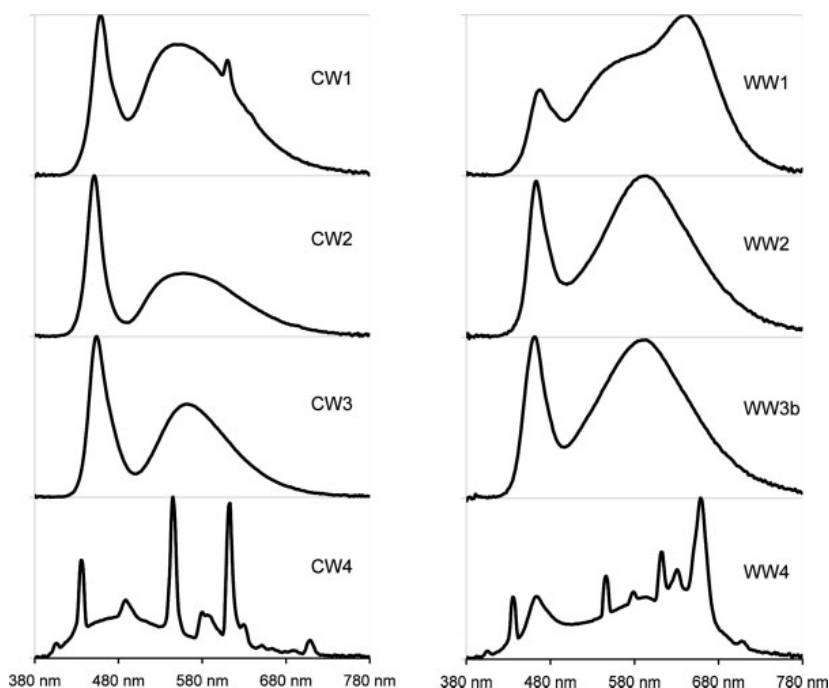
Baserat på de ursprungliga empiriska data som presenteras här, föreslås gamut-area index (GAI, definierad i tillägget), som ett praktiskt kompletterande mått till det mer väletablerade CRI vid karakterisering av färgåtergivande egenskaper hos elektriska ljuskällor. Dessa data visar att ljuskällor som uppfyller både CRI-kriteriet 80 och ett GAI mellan 80 och 100 genomgående säkerställer att föremål uppfattas som "naturliga" och "levande" och att subtila skillnader i nyans kommer att uppfattas. Det är också bevisat här att bra färgåtergivning endast kan uppnås under tillräckliga nivåer av irradians; bra färgåtergivning är inte möjligt under låga ljusnivåer.

## METODER

Tre experiment utfördes. Varje experiment undersökte färgåtergivningsegenskaperna hos bland annat fosfor-baserade ljuskällor. I det första experimentet användes endast varma (låga) CCT (<4000 K), i det andra användes enbart kalla (höga) CCT ([5000 K), och i det tredje användes både varma och kalla CCT.

Varje experiment integrerade två typer av uppgifter: en färgdifferentieringsuppgift och en jämförelseuppgift. I den första uppgiften utförde observatörer det s.k. Farnsworth-Munsell 100-nyanstestet för fyra olika ljuskällor och två ljusnivåer (Se figur 1, till höger).

I den andra uppgiften visades observatörerna ett kollage av bilder som visade två arter av fåglar; en blå och en röd. Observatörerna var ombedda att jämföra "naturlighet" och "livlighet" för var och en av de olika typerna av fåglar, under olika slags ljusförhållanden. Observatörerna gjorde även en bedömning av den totala "naturligheten" och "livligheten" i kollaget. Subjektiva utvärderingar av färgåtergivning kan vara svåra att analysera om observatörernas utvärderingskriterier inte är klart definierade (t.ex. vaga beskrivningar som "preferens"), eller om observatörer utvärderar olika funktioner i samma skärm (t.ex. en multichromatic där vissa observatörers fokus är på endast en färg och andra observatörer ger en övergripande betyg). För att minimera dessa problem syftar den aktuella studien till (1) att leda observatörernas uppmärksamhet till särdragen hos bilderna i kollaget, såsom röda eller blå färger, samt (2) använder specifika subjektiva bedömningskriterier, såsom "naturlighet" och "livfullhet". Även utvärderingarna av "naturligt" var öppna för egen tolkning av observatörerna, denna instruktion fördes som en återspeglning av ett subjektivt kriterium som ansågs viktigt av utvecklarna av CRI och var avsedd att bidra till att säkerställa en högre grad av samstämmighet mellan observatörer i sina utvärderingar än vad som annars skulle ha skett med ett tvetydigt kriterium som "preferens".



Figur 2: Normaliserade spektrala effektfördelningar för de belysningsmedel som användes i denna studie vid 50 fc. Färgegenskaper för varje belysningsmedel är sammanfattade i tabell 1.

## Apparatur

En mattvit visningskub, 2 fot på varje sida (figur 1, höger sida), gav belysning från en av åtta olika spektrala effektfördelningar (SPD; Figur 2). Dessa SPD framställdes av fem kommersiellt tillgängliga fosforbaserade vita lysdioder (Luxeon I 3000 och 5000 K; Nichia Jupiter 3300 och 6500 K; Seoul Semiconductor P3 6500 K) och två olika linjära lysrör (F40T12, 2900 K, Promolux Platino; och F32T8, 5000 K, Lumichrome). De två SPD som användes i försöken fick man fram genom att blanda ljus från två källor.

CCT, CRI, GAI och komplett färgindexspektrum (FSCI) användes för att karakterisera färgegenskaperna hos de åtta ljuskällorna (tabell 1). Innehållet i denna tabell erhöles från faktiska SPD som reflekterades från innerväggarna av kuben som bestäms av en kalibrerad spektrometer (PR-705, Foto Research, Chatsworth, CA). För teständamålet var ljuskällorna grupperade i termer av CCT. Källornas CCT i det första experimentet (betecknad WW1 till WW4) varierade från 2900-3800 K ("varmvit"), medan källornas CCT i det andra experimentet (betecknad CW1 till CW4) varierade mellan 5000-6700 K ("kallvit"). I det tredje experimentet användes WW1, WW2, CW1 och CW2. Elektrisk dimning användes för att modulera/differentiera ljusutsläppet från lysdioderna; mekaniska skärmar eller neutrala täthetsfilter användes med lysrören. Tabell 1 visar de resulterande skillnaderna i spektrala egenskaper på grund av ljusregleringen/dimningen. Farnsworth-Munsell 100-nyanstest består av 85 färgskivor arrangerade i fyra serier och används i stor utsträckning som ett test av färgseende.

Tabell 1. Färgegenskaper hos de åtta vita ljuskällor som användes i denna studie.

Ljuskälla	CCT (K)	CRI	GAI	FSCI
WW1-5 fc	3157	95	52	66
WW1-50 fc	3174	95	55	67
WW2-5 fc	3399	80	64	68
WW2-50 fc	3443	80	64	68
WW3b-5 fca	3707	81	73	72
WW3b-50 fca	3732	81	74	72
WW4-5 fcb	3279	92	94	79
WW4-50 fcb	3261	91	93	77
CW1-5 fc	5069	75	65	60
CW1-50 fc	5137	75	66	61
CW2-5 fc	6502	78	95	73
CW2-50 fc	6682	78	97	74
CW3-5 fc	6400	72	81	63
CW3-50 fc	6126	71	81	64
CW4-5 fc	5239	94	90	72
CW4-50 fc	5854	94	99	74

Färgstatistik har hämtats från spektrala effektmätningar om tagits från väggarna i den experimentella monter vid både 5 och 50 fc.

a) WW3b var resultatet av att blanda 85% av WW2 och 15% av CW2.

b) WW4 var resultatet av att blanda 52% av WW2 och 48% av en F40T12 3000 K Promolux Platino lampa.

Det har även använts för att testa färgåtergivningsegenskaperna hos olika ljuskällor. Var och en av de fyra skivserierna arrangeras i en trälåda till vilken två ankarskivor permanent monteras vid extremerna. De två skivankarna visar start- och ändpunkterna för varje serie. Observatörernas uppgift är att ordna skivorna i varje serie enligt deras nyans mellan de två ankarskivorna. Testet var ursprungligen utformat för att utföras under relativt höga ljusnivåer (belysningsstyrka > 25 fc) och i dagsljus eller en jämförbar elektrisk ljuskälla, såsom CIE Illuminant C-lampan. Det finns ingen tidsgräns för genomförandet av uppgiften och tid är heller inte en del av resultatpoängen. Ett testresultatpoäng är baserat på antalet omflyttningar, dvs. antalet inkorrekt placerade färgskivor inom varje serie. I denna studie genomförde betraktarna det kompletta testet (fyra färgserier) under omständigheter med diffust dagsljus (belysningsstyrka > 50 fc) och med varje kombination av SPD och ljusnivå i alla tre experimenten. Eftersom att ett nytt par observatörer deltog i varje experiment, var det inte möjligt att jämföra absoluta prestandapoäng tvärs över experimenten. Vidare, eftersom ingen av ljuskällorna som användes i studien var CIE Illuminant C, var en exakt mätning av färgdifferentiering inte möjlig att genomföra, särskilt när varmvita ljuskällor användes. Visserligen var interaktionerna mellan källans SPD och den spektrala reflektansen hos skivorna inte bedömd. Dessutom då en av de experimentella ljusnivåerna (5 fc) var lägre än minimum-rekommendationen för testet (belysningsstyrka > 25 fc), var det återigen inte möjligt att göra exakta bedömningar av färgdifferentieringen för denna typ av omständigheter. Därför bör resultaten av denna studie endast tas som relativa jämförelser av färgdifferentiering under varje av dessa specifika ljusomständigheter. Kollaget bestod av sex bilder innehållande blå och röda fåglar. Två av bilderna visade även mänskliga hudtoner och grönt lövverk som en del av helheten. En högkvalitativ utskrift på 17 x 11 tum skrevs ut på 29 lb halvmatt vitt papper, med 2400 gånger 2400 punkter/tum, med en fyrfärg (turkos, magenta, gul, svart) emulsions-aggregation toner-skrivare (DocuColor 240PS; Xerox Corporation, Stamford, CT). Utskriften sattes upp på ett staffli med skumskiva, och vinkeln var justerad för att förebygga döljande reflektioner.

### **Observatörer**

Tolv observatörer deltog i det första samt det andra experimentet och 10 observatörer deltog i det tredje experimentet. Ett totalt antal av 29 observatörer deltog i studien, 19 manliga och 10 kvinnliga; två observatörer deltog i båda uppgifter av alla tre experiment och två deltagare deltog i båda uppgifter i det första samt andra experimentet. Resten av deltagarna deltog i en eller två uppgifter i de olika experimenten. Samtliga hade normalt färgseende, enligt testresultaten av Ishiara pseudoisochromatic plates testmetod, och var justerade till normal synskärpa (20/20 eller bättre). Medelåldern för samtliga var 32 år (intervall: 19-62 år, standardavvikelse: 13,6 år).

### **Procedur**

Observatörerna instruerades om avsikten med studien vid början av varje experiment och om det bedömdes vara nödvändigt visades mindre presentationer för att hjälpa till med att klargöra procedurerna. Under Farnsworth-Munsell 100-nyans testförsöken, slutförde observatörerna uppgiften först i naturligt dagsljus från ett norr-fönster (illuminance > 50 fc) och därefter, under var och en av de fyra ljuskällorna i varje experiment vid två ljusnivåer, 5 och 50 fc (se figur 1). Ordningen på ljusnivån, testserierna och ljuskällorna slumpades inför varje person. På ett givet kopplings-jämförelse-test, visades deltagarna bildkollaget och det var i tur och ordning belyst med två olika SPDs. Betraktarna tilläts titta på kollaget under den första SPDn så länge de ville innan det byttes mot den andra SPDn. När den andra SPDn väl hade blivit visad gick det inte att titta på kollaget igen under den första SPDn, enligt detta protokoll. I varje experiment, för båda ljusnivåerna, 5 och 50 fc, var kollaget sett av varje observatör tre gånger under fyra olika SPDs. Alla försök för den ena ljusnivån slutfördes innan försöken slutfördes för den andra ljusnivån. Ordningen på ljusnivåerna uppvägsdes

mellan deltagarna. Sex möjliga kopplings-jämförelser, var och en i två sekvenser, kan utföras för fyra olika SPDs; ordningen på de 12 kopplings-jämförelserna var slumpmässigt presenterade för observatörerna i en eller två sessioner per ljusnivå. För varje SPD kopplings-jämförelse, blev observatörerna först tillfrågade vilken SPD som återgav kollaget som helhet, mest "livfullt". På samma sätt blev observatörerna tillfrågade, under en andra session för samma ljusnivå, vilken ljuskälla de tyckte bäst återgav kollaget som helhet mest "naturligt". Därefter utvärderade de rött och blått som mer eller mindre "naturligt". Totalt utförde varje observatör 144 kopplings-jämförelser för varje experiment (12 möjliga kopplings-jämförelser x 3 upprepningar x 2 ljusnivåer [5 och 50 fc] x 2 frågor [livfullhet och naturlighet] = 144 visningar). De experimentella sessionerna schemalades enligt observatörernas önskemål och slutfördes under loppet av flera dagar för varje observatör.

## RESULTAT

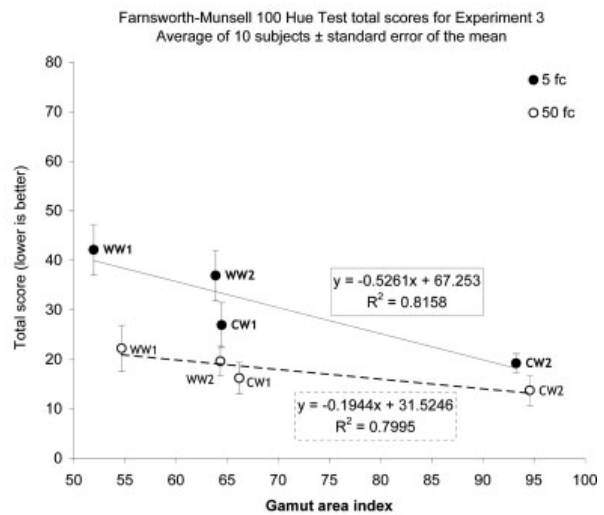
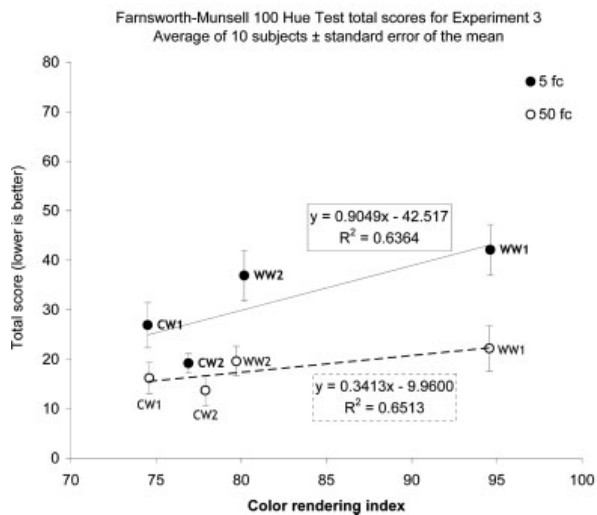
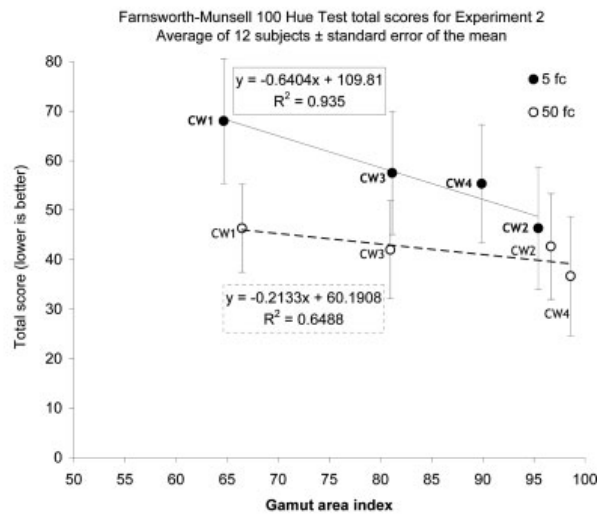
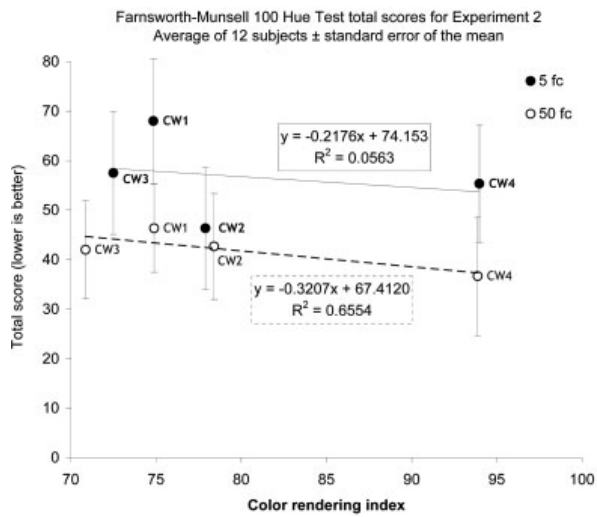
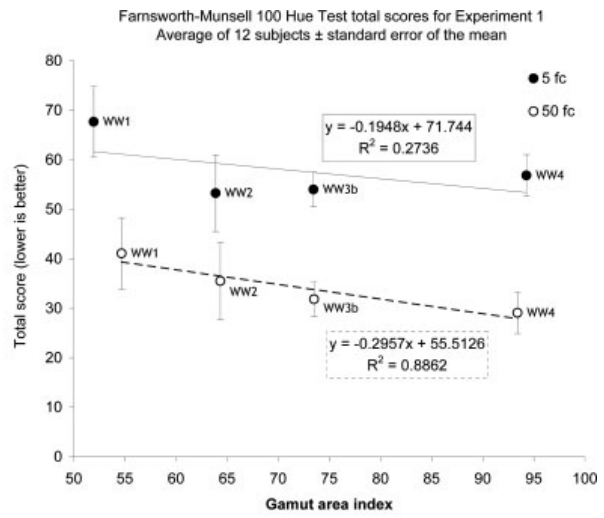
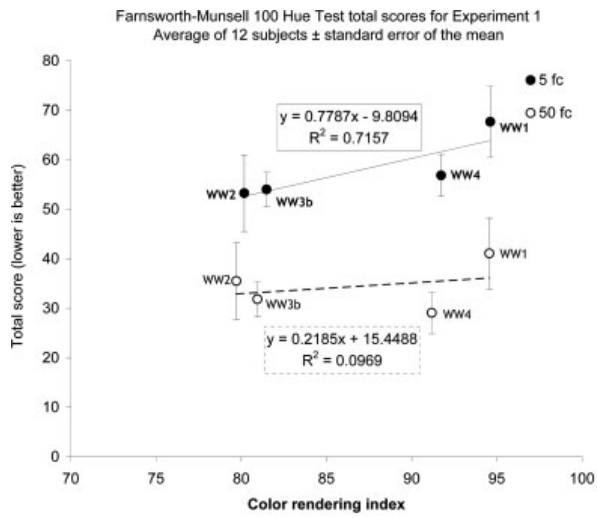
### Farnsworth-Munsell 100-nyanstest

Figur 3 visar resultaten av Farnsworth-Munsell 100-nyanstest för de tre experimenten i på varandra följande panel-rader. Varje panel i figur 3 visar den totala poängen för båda ljusnivåer, 5 och 50 fc, ritat som en funktion av CRI (vänster) och GAI (höger). Lägre totalpoäng i Farnsworth-Munsell systemet indikerar bättre färgdifferentiering. Med denna figur kan tolkningen göras att ljusnivå är viktigt för färgdifferentiering. Totalpoängen är genomgående lägre vid 50 fc än vid 5 fc för alla ljuskällor i varje experiment. Det är även tydligt enligt figuren att GAI är bättre än CRI som en prediktor av färgdifferentiering. Kurvorna för de sex linjära regressionerna (två ljusnivåer i tre experiment) som rör totalpoäng och GAI är alltid negativa, vilket är väntat då ett ökat GAI gav bättre färgdifferentiering. Både positiva och negativa kurvor noterades för CRI, vilket tyder på att CRI är orelaterat eller i alla fall inkonsekvent relaterat till färgdifferentiering. Ett annat sätt att jämföra de prediktiva förmågorna hos varje mått är genom att titta på deras förmåga att rangordna de fyra ljuskällorna i varje experiment. Ett totalt antal på fyra omkastningar av skivorna (dvs. fel) noterades i rangordningen av ljuskällorna med GAI, medan 15 omkastningar noterades med CRI. Genom att använda ett enkelt poängsystem baserat på Farnsworth-Munsells procedur, skulle de totala fel-poängen blir 12 respektive 68 för GAI och CRI.

### Kopplings-jämförelser

Figur 4 visar resultaten av kopplings-jämförelserna för de tre experimenten i på varandra följande rader. Varje rad i figur 4 visar medelprocenten av antalet gånger som en ljuskälla valdes framför de andra i kopplings-jämförelserna. Varje separat panel visar de procentsatser för bedömningarna av röda, blå och övergripande, grupperade efter ljusnivå; data för 5 fc presenteras på den vänstra halvan av en panel och data för 50 fc presenteras till höger.

Kopplade jämförelser som använder "livfullhet" som bedömningskriterium visas i de vänstra panelerna enligt figur 4; de för "naturlighet" visas i högra panelerna. De genomsnittliga procentsatserna för preferensen för olika stimuli (röda objekt, blå objekt och övergripande) vid andra ljusnivåer (5 eller 50 fc) och för olika subjektiva kriterier ("klarhet" eller "naturlighet") anpassades sedan som en funktion av CRI och GAI för att avgöra hur de två måtten relaterade till kopplings-jämförelsedatan. Linjära regressioner användes för att utvärdera de olika relationerna. Tabell 2 visar resultaten av dessa linjära regressioner. Tabell 3 visar antalet negativa ( $m < 0$ ) eller "noll" ( $|o| < 0,001$ ) kurvor från de linjära regressionerna i tabell 2 och sannolikheten för att varje andel skulle inträffa av en slump. Man kan därmed dra slutsatsen av tabell 3 att GAI är en bra prediktor för svar när objekt belyses av varmvita källor (experiment 1) och att CRI är en bra prediktor för svar enligt kallvita källor experiment 2), men inte tvärtom.



Figur 3. Resultatpoäng för Farnsworth-Munsell 100-nyanstest, för experiment 1-3 ritat som en funktion av CRI och GAI för båda ljusnivåer.

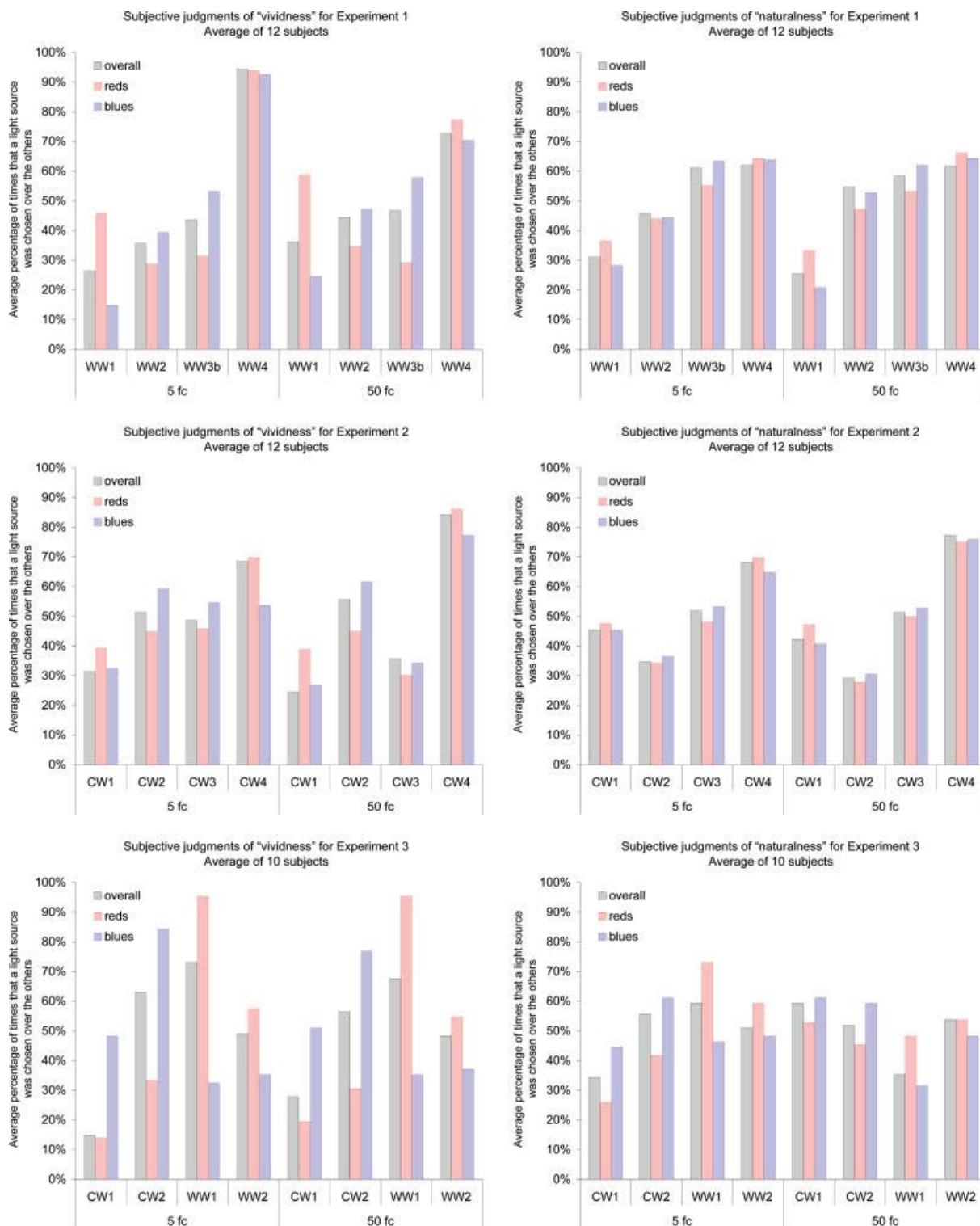
Figur 5 illustrerar en annan aspekt av behovet av mer än en parameter för att kunna säkerställa god färgåtergivning. Denna figur visar ett urval av de regressioner från tabell 2 som illustrerar iakttagelsen att CRI och GAI är differentiellt relaterade till subjektiva bedömningar av objektsfärger. Specifikt i experiment 3, där blandade CCT användes, var CRI prediktiva för subjektiva bedömningar av "livfullhet" för röda ( $p < 0,05$ ), men är inte prediktiv för subjektiva bedömningar för blå. Omvänt verkar GAI vara prediktiva för subjektiva bedömningar av "livfullhet" för blå ( $P < 0,05$ ), men inte för röda. Dessutom, i det enskilda fallet som illustreras i figur 5, finns det en negativ korrelation mellan subjektiva bedömningar av blå för CRI samt mellan subjektiva bedömningar av röda för GAI. Chi-square statistiska test utfördes även på data i figur 5 för att avgöra om de kopplade jämförelsernas rangordning var systematiskt relaterad till CRI och GAI i experiment 3. Vid 50 fc när personer använde "livfullhet" som utvärderingskriterium, WW1, var källan med det högsta värdet av CRI, statistiskt rankad högre ( $X^2 \frac{1}{4} 49,4$ ,  $P < 0,001$ ) än de andra tre källorna för röda objekt (övre vänstra panelen) och CW2, den källa med det högsta värdet av GAI, var statistiskt rankat högre ( $X^2 \frac{1}{4} 21,0$ ,  $P < 0,001$ ) än de andra tre källorna för blå objekt (nedre högra panelen). En annan intressant och viktig iakttagelse från figur 4 är de direkta jämförelser mellan varma ljuskällor och kalla ljuskällor (experiment 3) för olika objektsfärger (röda eller blå) när observatörer ombads basera sina subjektiva bedömningar på "livfullhet". Varma ljuskällor valdes fler gånger framför kalla ljuskällor för röda objekt. Omvänt, valdes kalla ljuskällor fler gånger framför varma ljuskällor för blå föremål. Tendenserna för övergripande bedömningar är tveitydiga, men verkar i huvudsak vara baserade på det starkare bedömningskriteriet; nämligen att vid betraktande under kalla ljuskällor, verkar de övergripande bedömningarna av kollaget vara baserade på färgåtergivning av blå föremål, medan när kollaget betraktas under varma ljuskällor, är de övergripande bedömningarna till synes baserade på färgåtergivning av röda föremål. Denna observation är mer eller mindre sann för bedömningen av "naturlighet", men skillnaden i genomsnittliga procentsatser för preferens mellan ljuskällor är mindre.

## DISKUSSION

### **CRI är helt enkelt inte tillräckligt.**

För sextio år sedan angav Bouma, i sin beskrivning av färgåtergivningsegenskaperna hos dagsljus, egenskaper som är viktiga för en ljuskälla. En ljuskälla med bra färgåtergivningsegenskaper bör ge ett komplett utbud av objektfärgsuppfattningar, bör möjliggöra god färgdifferentiering, och bör inte göra att färgerna ser förvrängda ut. För femtio år sedan utvecklades CRI för att tillgodose de sistnämnda av dessa egenskaper. Genom att använda familjära ljuskällor som referensljuskällor (glödlampor och dagsljus), trodde utvecklarna av CRI att elektriska ljuskällor som minimerade skiftningar i objektsfärgernas renhet skulle minimera förvrängning av färg och därmed bidra till att få objektsfärger att se mer "naturliga" ut. CRI erkändes med eftertryck av dess utvecklare som ett enda mått som påstods behandla endast en aspekt av färgåtergivning ("naturlighet") och därför noterades detta följaktligen som ett ofullständigt mått på färgåtergivande egenskaper hos en ljuskälla. Några decennier senare, är dock CRI för närvarande det viktigaste kriteriet som används av belysningsbranschen för att beskriva färgåtergivningsegenskaper hos elektriska ljuskällor och det är den enda som är allmänt accepterat. Data presenterad här och argumenten som presenterats under de senaste 50 åren, stödjer de argument som dess utvecklare nämnde, nämligen att CRI inte är ett universellt mått på färgåtergivning.





Figur 4. Procent av tiden som en ljuskälla valdes framför andra under de kopplade jämförelserna.

Tabell 2. Linjära ( $y = mx + b$ ) regressioner relaterade till de kopplade jämförelsernas rangordning (för röda, och blå objekt samt för den övergripande utvärderingen) för CRI och GAI, vid varje ljusnivå (5 och 50 fc) och för varje experiment (1, 2 och 3).

	Naturalness 5 fc			Naturalness 50 fc			Vividness 5 fc			Vividness 50 fc		
	<i>m</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>m</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>m</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>m</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>
Experiment 1 WW1, WW2, WW3b, WW4												
CRI												
Overall	-0.0076	1.1655	0.1425	-0.0135	1.6706	0.3618	0.0104	-0.4085	0.0617	0.0030	0.2361	0.0203
Red	-0.0014	0.6177	0.0064	-0.0035	0.8050	0.0364	0.0269	-1.8438	0.4156	0.0255	-1.7112	0.7160
Blue	-0.0086	1.2521	0.1340	-0.0155	1.8414	0.3249	-0.0007	0.5632	0.0003	-0.0082	1.2128	0.0979
GAI												
Overall	0.0073	-0.0150	0.7858	0.0079	-0.0678	0.6243	0.0163	-0.6580	0.9229	0.0093	-0.1674	0.9522
Red	0.0067	0.0244	0.9655	0.0081	-0.0781	0.9582	0.0126	-0.3918	0.5538	0.0063	0.0475	0.2199
Blue	0.0084	-0.0973	0.7780	0.0099	-0.2071	0.6620	0.0182	-0.7868	0.9978	0.0111	-0.2953	0.8939
Experiment 2 CW1, CW2, CW3, CW4												
CRI												
overall	0.0104	-0.3316	0.5252	0.0145	-0.6517	0.5122	0.0128	-0.5218	0.6716	0.0240	-1.4052	0.8469
red	0.0119	-0.4523	0.6163	0.0131	-0.5385	0.4599	0.0133	-0.5594	0.9006	0.0246	-1.4580	0.9956
blue	0.0083	-0.1632	0.4522	0.0136	-0.5808	0.4906	0.0031	0.2509	0.0640	0.0205	-1.1300	0.7671
GAI												
overall	0.0003	0.4753	0.0008	0.0040	0.1609	0.0856	0.0090	-0.2446	0.6354	0.0156	-0.8377	0.8044
red	-0.0002	0.5189	0.0004	0.0019	0.3331	0.0229	0.0051	0.0766	0.2563	0.0106	-0.4054	0.4101
blue	0.0003	0.4783	0.0009	0.0042	0.1389	0.1055	0.0084	-0.1948	0.8867	0.0147	-0.7600	0.8833
Experiment 3 CW1, CW2, WW1, WW2												
CRI												
Overall	0.0085	-0.1881	0.4621	-0.0122	1.4867	0.9806	0.0205	-1.1620	0.5069	0.0162	-0.8173	0.6638
Red	0.0203	-1.1438	0.7581	-0.0017	0.6375	0.1326	0.0376	-2.5519	0.8986	0.0380	-2.5798	0.9080
Blue	-0.0023	0.6876	0.0732	-0.0153	1.7399	0.8985	-0.0140	1.6385	0.2708	-0.0113	1.4140	0.2445
GAI												
Overall	0.0004	0.4759	0.0034	0.0022	0.3462	0.1446	0.0007	0.4500	0.0028	-0.0002	0.5109	0.0003
Red	-0.0059	0.8982	0.2686	-0.0014	0.5943	0.3786	-0.0113	1.2597	0.3363	-0.0118	1.3179	0.3887
Blue	0.0038	0.2415	0.8392	0.0052	0.1387	0.4630	0.0130	-0.3761	0.9686	0.0107	-0.2377	0.9666

Efter reflektion av dessa tidiga argument och uppgifter som presenteras här, lade Rea och medarbetare fram föreställningen att tre mätvärden skulle kunna användas för att bedöma de färgåtergivande egenskaperna hos ljuskällor: CRI, GAI, och FSCI. Dokumentet föreslog att vart och ett av de tre måtten kan användas för att karakterisera olika aspekter av färgåtergivning; naturlighet (CRI), måttnad (GAI), och differentiering (FSCI). Dock indikerar datan som presenteras här, för första gången att en enkel homologi mellan ett givet färgåtergivningsmått (t.ex. GAI) och ett färgåtergivningskriterium (t.ex. "livfullhet") inte är perfekt. Snarare verkar det som att mätetal måste användas tillsammans för att säkerställa god färgåtergivning. De två ljuskällor med de högsta värdena av CRI samt GAI valdes alltid framför de andra källorna i experiment 1 och 2. I experiment 1, blev WW4 vald varje gång (12 av 12 gånger;  $p < 0,00024$ ) när den jämfördes med andra ljuskällor för båda ljusnivåer (5 och 50 fc), samtliga tre stimuli (röda objekt, blå objekt och övergripande), samt för båda utvärderingskriterium ("naturlighet" och "livfullhet"). CW4 valdes vid 11 av de 12 jämförelserna i experiment 2; den enda gången som det inte valdes var vid bedömningskriteriet "livfullhet" för blå objekt vid 5 fc, men det är viktigt att notera att under dessa omständigheter hade CW2 faktiskt ett högre värde på GAI än CW4 och, såsom tidigare diskuterats, är GAI en bättre prediktor för färgintensiteten än CRI för blå objekt. Sålunda i nästan samtliga fall (23 av 24 gånger), hade den föredragna ljuskällan i de kopplade jämförelserna de högsta värdena av både GAI och CRI. Det är också värt att notera, även om resultaten inte visas här, att de enskilda CRI-värden, R9, som påstås karakterisera färgåtergivningsfunktionerna hos en ljuskälla för röda objekt inte var mer prediktiva av den kopplade jämförelsedatan för "livfullhet" av röda objekt än vad som var det totala värdet av CRI självt. R12, påstått att karakterisera färgåtergivningsfunktionerna hos en ljuskälla för blå objekt, var inte alls prediktiv för den kopplade jämförelsedatan för "livfullhet" av blå objekt. Således verkar det som om GAI är bättre på att förutsäga subjektiva bedömningar för blå objekt än CRI eller någon av dess enskilda submätvärden. När det gäller färgdifferentiering, visar data i figur 3 att CRI inte är användbart för att förutsäga prestanda under de förhållanden som testades. Snarare verkar det som om GAI alltid är mer prediktivt för färgdifferentieringsprestanda än CRI. Ändå var ljuskällorna som hade höga värden av CRI samt GAI (WW4 och CW4) överlägsna vid färgdifferentiering samt för

kopplade jämförelser. Den centrala tesen med denna artikel är då att CRI ensamt inte alltid kommer att på ett tillfredsställande sätt representera de färgåtergivande egenskaperna hos en ljuskälla och att ett annat färgåtergivningsmått, GAI, bör användas i kombination med CRI i specifikationerna för belysning av utrymmen och objekt där färgåtergivningen är viktig. De data som presenteras här är förenliga med nuvarande belysningsrekommendationer för belysning av neonatala intensivvårdsavdelningar (NICUs); lampor bör främst innehålla ett minsta CRI-värde på 80, minst FSCI på 55, och ett GAI mellan 80 och 100. Ljuskällor som uppfyller de CRI-, GAI- och FSCI-kriterier som föreslås i NICU's belysningsstandard (dvs. WW4 och CW4) tycks alltid ge överlägsen färgdifferentiering och högre betyg vad gäller "livfullhet" och "naturlighet". Det återstår dock att bestämmas, huruvida FSCI ger någon större nytta bortom CRI och GAI för att karakterisera färgåtergivningsegenskaper hos elektriska ljuskällor. Även samspelet mellan CRI och GAI återstår att studeras. Till exempel, återstår det att bestämmas om ett högt (och i så fall hur högt) värde av GAI kan kompensera för ett lågt värde av CRI, eller vice versa.

Tabell 3. Proportioner av negativ (motsatt förväntade trenden,  $m < 0$ ) och noll (ingen trend;  $|o| < 0,001$ ) kurvor från de linjära regressionerna i tabell 2.

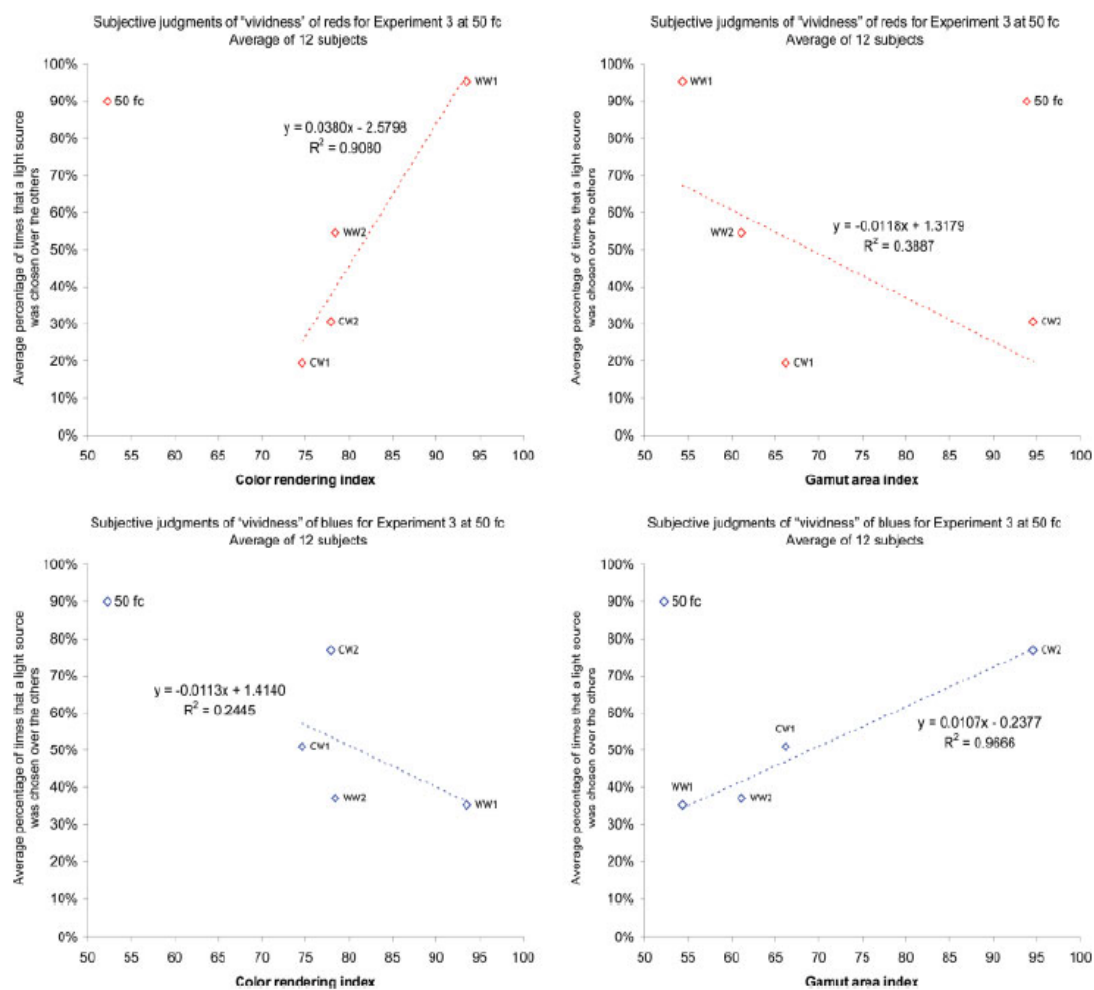
	CRI	GAI
Experiment 1 WW1, WW2, WW3b, WW4	8 out of 12 (from 0 to 8 inclusive, $P = 0.927$ )	0 out of 12 ( $P = 0.00024$ )
Experiment 2 CW1, CW2, CW3, CW4	0 out of 12 ( $P = 0.00024$ )	3 out of 12 (from 0 to 3 inclusive, $P = 0.073$ )
Experiment 3 CW1, CW2, WW1, WW2	6 out of 12 (from 0 to 6 inclusive, $P = 0.613$ )	7 out of 12 (from 0 to 7 inclusive, $P = 0.806$ )

## Ytterligare insikter

Strålningsnivå är viktigt för bra färgåtergivning. Förutom att uppfylla de för NICU fastställda färgåtergivningskriterierna, är det nödvändigt att ha en tillräcklig belysningsnivå för att säkerställa en god färgåtergivning. Litteraturen visar konsekvent att belysningsnivåer på 100 fc eller mer krävs för bästa prestanda på Farnsworth-Munsells 100-nyanstest. Denna studie visade att färgdifferentiering alltid var bättre vid 50 fc än vid 5 fc. Baserat på litteraturen krävs troligtvis ännu högre nivåer för en ännu bättre differentiering av färg.

De två subjektiva färgåtergivningskriterier som används av observatörer i denna studie; "naturlighet" och "livfullhet", verkar inte vara anmärkningsvärt annorlunda när det gäller deras relationer till de två färgåtergivningsmåten CRI och GAI. Såsom visas i figur 4, är den kopplade jämförelsedatan liknande för båda subjektiva kriterier. Det förefaller dock att "naturlighet" är ett mer tvetydigt subjektivt kriterium än "livfullhet" för observatörer att förstå och svara på i experimentet vilket återspeglas i mindre tydliga skillnader mellan de olika ljuskällorna i den kopplade jämförelsedatan (figur 4). Denna slutsats stöddes genom informella rapporter från personer vid början av experimentet. De kommenterade ofta att de inte visste exakt vad som menades med "naturlighet". Därför är "naturlighet", trots dess betydelse i utveckling av CRI, kanske inte ett särskilt meningsfullt subjektivt kriterium för färgåtergivning hos "vita" ljuskällor. CCT är också uppenbarligen viktigt för färgåtergivning på åtminstone två sätt. Röda objekt verkar vara viktigare för subjektiva bedömningar än blå objekt när de belyses av en varm CCT; det motsatta stämmer när blå och röda objekt upplyst av en kall CCT.

Dessa data förstärker indirekt tanken att en lampas CCT skall "kompletera" objektsfärger. Detta är ingen överraskning för professionella inredare; varma ljuskällor bör användas tillsammans med röda och gula tyger och färger, medan kalla ljuskällor bör användas tillsammans med blå och gröna tyger och färger. För det andra, när det är viktigt att återge blå objekt väl under en varm ljuskälla, kommer GAI men inte CRI, att vara prediktivt för deras upplevda "livfullhet" och "naturlighet". Det motsatta gäller för rendering av röda objekt under en kall ljuskälla; CRI, men inte GAI, kommer att vara prediktiva för "livlighet" och "naturlighet". Eftersom de flesta miljöer har flera objektsfärger, är det viktigt att höga värden på både CRI och GAI används för att säkerställa att hela skalan av objektsfärger verkar levande och naturlig, och för att ge en bra färgdifferentiering.



Figur 5. Relationer mellan CRI (paneler till vänster) respektive GAI (paneler till höger) och den genomsnittliga andelen gånger som en ljuskälla valdes framför de andra vid användning av subjektiva bedömningar av "livfullhet" för rött och blått vid 50 fc.

Den senaste tidens snabba utveckling av ljusemitterande dioder (LED) har väckt nytt intresse för färgåtergivning. Flera studier har pekat på de begränsningar som gäller för CRI när ljuskällor, såsom röd-grön-blå lysdioder används för att producera vitt ljus. Även om LED användes i denna studie, kan en blandning av ljuskällor leda till avvikande resultat än de som presenteras här, men det verkar mycket osannolikt att ljuskällor som uppfyller både CRIs och GAIs rekommenderade kriteriumvärden för NICUs skulle återge objektsfärger dåligt.

Slutligen är begreppet god färgåtergivning utan tvekan beroende av situationen. De som utvecklade CRI var mest intresserade av att få objekt att visas "naturligt". Judd noterade att "smicker" skulle kunna vara ett annat viktigt färgåtergivningskriterium. Hans "smicker index" antogs aldrig, men det är tydligt att överexponerade, eller "onaturliga" färger också kan vara av vikt i vissa applikationer. Ett praktiskt exempel kan illustreras av att det ofta är viktigt för en slaktare att "förbättra" rodnaden i hamburgerköttet trots att det kan verka "onaturligt" rött just i den situationen. Det är dock uppenbart att en "köttlampa" skulle vara helt överflödigt i NICU. Därför är begreppet god färgåtergivning beroende av applikationen i fråga och inte en stel, oföränderlig egenskap hos den spektrala effektfördelningen av en ljuskälla. För att förstärka de förhoppningar som utvecklarna av CRI hade, bör mer sofistikerade försök genomföras för att förstå hur man styr SPD för en mängd olika avsedda ändamål.

## SAMMANDRAG

Även om detta tvåparametriska förslag accepteras behöver det inte nödvändigtvis vara det viktigaste som belysningsbranschen någonsin gjort förut, men det verkar vara ett användbar förbättring jämfört med en övertro på CRI som den enda mått på färgåtergivning. Ett antal författare har påpekat att CRI är otillräckligt som det enda måttet på färgåtergivning för elektriska ljuskällor. Det bör även erinras om att grundarna av CRI noterade detta redan för över 50 år sedan.

Fortfarande, efter ett halvt sekel, finns det inget annat mått som är allmänt vedertaget eller officiellt förkunnat som ersättning till eller ett komplement till CRI. Den aktuella studien visar att gamut-arean, eller mer exakt GAI, kan vara ett användbart och praktiskt komplement till det mer väletablerade CRI, för att säkerställa både god färgdifferentiering samt tillfredsställande uppfattningar av objektsfärgens "livfullhet" och "naturlighet".

Dessa data bekräftas också av de färgrenderingsrekommendationer som gäller för NICUs; en ljuskälla som ger ett CRI på minst 80 och ett GAI mellan 80 och 100 kommer att ge en bra färgdifferentiering och få föremål i den aktuella miljön att verka både "levande" och "naturliga", om adekvat belysning tillhandahålls. Slutligen bör det betonas att även om detta tvåparametriska förslag visar sig vara både nyttigt och praktiskt, bör ytterligare undersökningar genomföras för att avgöra huruvida dessa två mått är idealiska och tillräckliga för att säkerställa en god färgåtergivning för arkitektonisk belysning i allmänhet och för nischapplikationer i synnerhet.

## TACK

Författarna vill tacka Yukio Akashi, Andrew Bierman, Mariana Figueiro OCH Russ Leslie för tillhandahållna hjälpsamma kommentarer; Robert Wolsey och Rui Qi tackas för deras hjälp med experimenten samt John Bullough för tillhandahållna värdefull insikt i planeringen av experimenten och även för hans hjälp med den statistiska analysen.

## BILAGA

### Beräkning av Gamut Area Index

Gamut-arean för en ljuskälla beräknas vanligen som området av polygonen som definieras av kromaciteterna i CIE 1964 färgområde i de åtta CIE standardfärgproven som anges i CIE Technical Report No. 13.3-1995 vid belysning med en testljuskälla. För denna studies ändamål, skalades energispektrums gamut-area till 100 och definieras som gamut-area index (GAI). Övriga ljuskällor skalas enligt denna princip. GAI är ett passande mått att komplettera CRI med eftersom, det precis som CRI, härstammar från den spektrala effektfördelningen hos en ljuskälla och de resulterande kromaciteterna av samma åtta CIE standardfärgprov.

1. Nickerson D. Light sources and color rendering. *J Opt Soc Am* 1960;50:57–69.
2. Commission Internationale de l'Éclairage (CIE). CIE publ. no. 13.3:1995. Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources. Vienna, Austria: CIE Central Bureau; 1995. 16 p. REF CIE 13.3-1995.
3. Judd DB. A flattery index for artificial illuminants. *Illum Eng* 1967;62:593–598.
4. Narendran N, Deng L. Color rendering properties of LED light sources. In Ferguson IT, Narendran N, DenBaars SP, Park Y-S, editors, the Proceedings of SPIE, Volume 4776 Solid State Lighting II; Seattle, WA, 2002. p 61–67.
5. Pracejus WG. Preliminary report on a new approach to acceptance studies. *Illum Eng* 1967;62:663–673.

6. Thornton WA. Color-discrimination index. *J Opt Soc Am* 1972;62:191–194. (Available online at <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=josa-62-2-191>).
7. Thornton WA, Chen E. What is visual clarity? *J Illum Eng Soc* 1978;7:85–94.
8. Boyce PR, Simons RH. Hue discrimination and light sources. *Light Res Tech* 1976;9:11–24.
9. Guo X, Houser KW. A review of colour rendering indices and their application to commercial light sources. *Light Res Tech* 2004; 36:183–199.
10. Rea M, Deng L, Wolsey R. *NLPIP Lighting Answers: Light Sources and Color*. Troy, NY: Rensselaer Polytechnic Institute; National Lighting Product Information Program; 2004.
11. Thornton WA. Lamps for assessing metamerism. *J Illum Eng Soc* 1974;3:11–18.
12. Thornton WA. The high visual efficiency of prime color lamps. *Light Design Appl* 1975;5:35–41.
13. Thornton WA, Corth R, Evans GS. Fluorescent light sources. *Light Design Appl* 1975;5:6–14.
14. Davis W, Ohno Y. Toward an improved color rendering metric. In Ferguson IT, Carrano JC, Taguchi T, Ashdown IE, Editors, the Proceedings of SPIE, Volume 5941 Fifth International Conference on Solid State Lighting; San Diego, CA, 2005. p 59411G-1-8.
15. Commission Internationale de l'Éclairage (CIE). CIE publ. no. 177:2007. Colour rendering of white LED light sources. Vienna, Austria: CIE Central Bureau; 2007. 14 p.
16. Farnsworth D. The Farnsworth-Munsell 100-Hue and dichotomous tests for color vision. *J Opt Soc Am* 1943;33:568–578.
17. Farnsworth D. *The Farnsworth-Munsell 100-Hue test for the Examination of Colour Discrimination: Manual*. Baltimore, MD: Munsell Color Company; 1957.
18. Rea M, Deng L, Wolsey R. *NLPIP Lighting Answers: Full-Spectrum Light Sources*. Troy, NY: Rensselaer Polytechnic Institute; National Lighting Product Information Program; 2003 (revised March 2005).
19. Viliunas V, Lukauskiene R, Švežda A, Žukauskas A. End-box scoring artefact evaluation of the Farnsworth-Munsell 100-Hue colour vision test. *Ophthalmic Physiol Optic* 2006;26:580–586.
20. Boyce PR. Illuminance, lamp type and performance on a colour discrimination task. *Light Res Tech* 1976;8:195–199.
21. Donaldson GB. Instrumentation for the Farnsworth-Munsell 100-hue Test. *J Opt Soc Am* 1977;67:248–249.
22. Bowman KJ, Cole BL. A recommendation for illumination of the Farnsworth-Munsell 100-hue test. *Am J Opt Phys Opt* 1980;57:839–843.
23. Verriest G, Van Laethem J, Uvijls A. A new assessment of the normal ranges of the Farnsworth-Munsell 100-hue test scores. *Am J Ophthalmol* 1982;93:635–642.
24. Knoblauch K, Saunders F, Kusuda M, Hynes R, Podgor M, Higgins KE, de Monasterio FM. Age and illuminance effects in the Farnsworth-Munsell 100-hue test. *Appl Opt* 1987;26:1441–1448.
25. Ishihara, S. *Tests for Colour-Blindness*. Handaya, Tokyo: Hongo Harukicho; 1917.
26. Figueiro MG, Appleman K, Bullough JD, Rea MS. A discussion of recommended standards for lighting in the NICU. *J Perinatol* 2006;26:S19–S26.
27. Worthey JA. Color rendering: Asking the question. *Color Res App* 2003;28:403–412.

28. Worthey JA. Color rendering: A calculation that estimates colorimetric shifts. *Color Res App* 2004;29:43–56.
29. van Trigt C. Color rendering, a reassessment. *Color Res App* 1999;24:197–206.