



Ljus, tid och rum

Ljuskvalitet, spektralfördelning och eko-
effektivitet för plasmalampa, i
jämförelse med högtrycksnatrium- och
induktionslampa

Tove Karlsson

2011

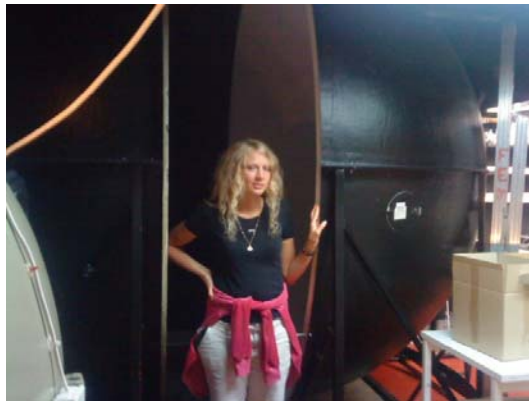
Miljövetenskap

Examensarbete för kandidatexamen 15 hp

Lunds universitet

Ljus, tid och rum

Ljuskvalitet, spektralfördelning och ekoeffektivitet för plasmalampa,
i jämförelse med högtrycksnatrium- och induktionslampa



Tove Karlsson

Kandidatarbete i miljövetenskap med inriktning fysik

2011

Handledare:

Sven Huldt
Institutionen för astronomi
Lunds Universitet

Företagskontakt:

Johan Andersson
Lightgrow

Innehåll

Begreppsförklaring	4
Abstract	5
Sammanfattning	6
1. Inledning	7
2. Bakgrund	8
2.1 Ecodesigndirektivet och utfasningen av glödlampan	8
2.2 Den nya teknikens möjligheter	8
3. Syfte	9
2.1 Avgränsningar	9
4. Metod	9
5. Teori	10
5.1 Vad är ljus?	10
5.2 Vad är ett plasma?	11
5.3 Ögat	12
5.3.1 Färgseende och kontrast	12
5.3.2 Bländning	12
5.4 Fysiska processer som ger ljus	13
5.4.1 Ljuskällor med diskreta spektrum	13
5.4.2 Ljuskällor med kontinuerliga spektrum	14
5.5 De analyserade ljuskällorna	15
5.5.1 Plasmalampa	16
5.5.1 HPS-lampa	16
5.5.2 Induktionslampa	17
5.6 Metodik för analys av ekoeffektivitet	18
5.7 Att mäta ljus	19
3.7.1 Color Rendering Index	19
5.7.2 Fotopisk, skotopisk och mesopisk fotometri	19
5.8 Mätinstrument	21
5.8.1 Integrerande sfär	21
5.8.2 Lumenmätning	22
5.8.3 Spektrometern	23
5.9 Ljusets betydelse för det mänskliga välbefinnandet	24
5.9.2 Fullspektrumljuskällor	24

5.9.1 God belysningsmiljö	25
6. Resultat.....	27
6.1 Lumen/Watt	27
6.1.1 Kalibreringsmätning med lågenergilampa:	27
6.1.2 Plasmalampa	28
6.1.3 High Pressure Sodium:	29
6.1.4 Induktionslampa:.....	29
6.2 Spektralfördelning	30
7. Beräknade resultat och andra observationer.....	32
7.1 Ljumsängd omräknat till skotopiskt seende.....	32
7.2 Jämförelse av spektralfördelningar, med samma skala för y-axeln.....	35
7.3 Sammanfattande tabell inkluderande materialrelaterade miljöegenskaper.....	36
8. Diskussion.....	37
8.1 Valet av ljuskänslighetsfunktion	37
8.1.1 Relativ jämförelse av spektralfördelningar	39
8.1.1 Plasmalampanns kontinuerliga spektrum	39
8.2 Miljöaspekter.....	39
8.2.1 Energirelaterad miljöbelastning	39
8.2.2 Materialrelaterade miljörisiker	40
Referenser	44
Elektroniska källor	45
Kurser och studiebesök	45

Begreppsförklaring

- **Ballast** och även **drossel** – en anordning som begränsar mängden ström i en elektrisk krets.
- **Belysningsstyrka eng. illuminance** - Ljusflöde per areaenhet på en yta
- **Candela** - SI-enheten för ljusintensitet. En candela är en lumen per steradian. Intensiteten för en ljuskälla i en specifik riktning uttrycks i candela. Varje ljuskälla har många olika intensiteter, beroende på vilken riktning man mäter i.
- **Colour Rendering Index (CRI)** – Ett mått på hur bra ljuskällan återger färgerna av ett objekt i jämförelse med en referenskälla. CRI definieras på en skala från 0 för monokroma ljuskällor till 100 för källor som sänder ut ett kontinuerligt synligt spektrum. Förutom den del av det synliga spektrat som den emitterande ljuskällan sänder ut är även intensiteten på strålningen i varje färg viktig. En källa som emitterar vitt ljus, men med högre procent av strålningen i den röda delen av spektrat än i den blå ger en känsla av varmt vitt och mestadels blå strålning skapar ett kallt vitt ljus. Denna egenskap kallas för färgtemperatur. Källor kallas vanligtvis varma när färgtemperaturen ligger under 3300 K och kalla vid färgtemperaturer över 5000 K.
- **Correlated Color Temperature (CCT)** - är en specifikation på utseendet på ljuset som emitteras från en lampa. Ljuset från lampan har samma färgåtergivning som färgen på ljuset från en referenskälla som hettas upp till en specifik temperatur. Mäts i grader Kelvin (K).
- **Efficacy (Ljusverkningsgrad)** – för ljuskällor och ljussystem uttrycks i lumen per watt
- **Efficiency** – uttrycker den procentuella andelen av antalet lumen från lampan som
- **Fotopiskt seende = dagsljusseende** Den fotopiska $V(\lambda)$ -kurvan beskriver ögats spektrala känslighetsfördelning för relativt höga ljusnivåer och bygger på tapparnas funktion.
- **Ljusbåge** – en kontinuerlig kraftig elektrisk urladdning genom luft. Luften blir elektriskt ledande eftersom den elektriska spänningen joniserat luften.
- **Ljusflödestätet eng. luminance** – den för ögat upplevda ljusheten hos en yta eller hos en ljuskälla.
- **Lumen** – är ett mått på ljusmängd, ljusenergi. Vid mätning i lumen ger man olika våglängder olika vikt i enlighet med den s.k. $V(\lambda)$ -kurvan. Förenklat sett kan man säga att lumenvärdet visar den ljusmängd det mänskliga ögat upplever i ett relativt ljust rum, för fotopiskt seende. I denna rapport har jag också beräknat motsvarande värden för skotopiskt seende med hjälp av $V'(\lambda)$ -kurvan. Enheten för de värdena betecknar jag lm'
- **Skotopiskt seende = mörkerseende** Den skotopiska $V'(\lambda)$ -kurvan beskriver ögats spektrala känslighetsfördelning för låga ljusnivåer. Bygger huvudsakligen bygger på stavarnas funktion och då ser man inga färger.
- **Spektrometer** – ett optiskt instrument för att dela upp ljus i olika våglängder. Detta för att kunna analysera vilka våglängder det innehåller. Med hjälp av ett diffraktionsgitter eller ett prisma sprids ljuset
- **Steradian** - rymdvinkeln hos en kon som har sin spets i centrum av en sfär och som skär av ett stycke av sfärens yta
- **Ulbrichtklot (Integrerande sfär)** – ihåligt klot där man placerar den ljuskälla man ska mäta ljusmängden för. Klotet har invändigt vit, matt yta, avsedd i första hand för bestämning av den totala ljusströmmen från en ljuskälla. Då ljuskällan placeras inuti sfären genomgår ljuset från denna upprepade gånger diffus reflexion, så att varje ytsegment av sfärens yta blir lika starkt belyst, om det avskärmas från det direkta ljuset från ljuskällan.

Abstract

The choice of light source is important for eco-efficient lighting. To assess the eco-effectiveness, it is essential to clarify how much and what kind of light you need, for each specific situation. To analyze this it is crucial to understand the need for different wavelengths.

The Plasma lamp has a continuous spectrum and gives a relatively high proportion of photons with high energy. In many critical situations, such as to discover a moose on the roadside in the darkness, it is essential that the spectrum contains a large enough share light with short wavelengths. The ability to see well at low brightness is also an important environmental issue. It is important that we feel that we can see, so that we can feel safe in the park without having to have loads of energy-consuming lighting everywhere, at all times. To compare the utility value of the lamps light under such circumstances, I have decided to convert my measured lumen values by using the eye's sensitivity curve for scotopic vision, ie. night vision. From this perspective the plasma lamp provides 72 lm'/ W, while the induction lamp provides 45 lm' / W and the HPS lamp 34 lm'/ W. From a conventional light-measurement perspective, it looks as if the HPS lamp provides the largest lm/W-value.

From environmental point of view, the plasma lamp's spectral distribution is very interesting because it allows for a minimum critical level of indulgence in an energy effective manner. In the current technological level of development, it is a serious limitation that the plasma technology only is economically feasible for large light sources. The report's way of thinking about the importance of different wavelengths can provide guidance for the selection of different types of LED-based light sources.

Sammanfattning

Valet av ljuskälla är viktigt för belysningens ekoeffektivitet. För att kunna bedöma ekoeffektiviteten är det grundläggande att klargöra hur mycket och vilken form av ljus man behöver i den aktuella situationen. För att kunna analysera detta på ett bra sätt är det viktigt att förstå vilka våglängder som fungerar bra, respektive dåligt, i olika fall.

Plasmalampan har ett kontinuerligt spektrum och ger relativt stor andel fotoner med hög energi. I många kritiska situationer, t.ex. för att i mörker kunna upptäcka en älg på vägrenen, är det väsentligt att spektret innehåller en tillräckligt stor andel ljus med korta våglängder. Möjligheten att kunna se bra vid låg ljusstyrka är också en viktig miljöfråga. Det är angeläget att vi upplever att vi kan se, så att vi t.ex. känner oss trygga i parken utan att vi måste ha massor av energikrävande belysning överallt hela tiden. För att jämföra nyttovärdet av lampornas ljus under sådana förhållanden har jag därför valt att räkna om mina uppmätta lumenvärden med hjälp av ögats känslighetskurva för mörkerseende. Ur detta perspektiv ger plasmalampan 72 lm/W, medan induktionslampan ger 45 lm/W och HPS-lampan 34 lm/W. Ur ett konventionellt ljusmätningsspektiv ser det ut som om HPS-lampan ger flest lm/W.

Miljömässigt sett är plasmalampan spektralfördelning mycket intressant eftersom det ger möjlighet till en minsta kritisk nivå av seende på ett energieffektivt sätt. På nuvarande tekniska utvecklingsnivå är det dock en allvarlig begränsning att plasmatekniken bara är ekonomiskt rimlig för stora ljuskällor. Rapportens tankesätt kring betydelsen av olika våglängder kan ge väsentlig vägledning för val av olika former av LED-baserade ljuskällor.

1. Inledning

Belysning har blivit en påtagligt viktig miljöfråga. En fjärdedel av världens genererade elektriska energi går till belysning och det görs nu stora satsningar på energieffektiv belysning, t.ex. genom EU:s regler om utfasning av glödlampor och andra energislösande ljuskällor. När frågorna om ljus och belysning aktualiserats har det också blivit mycket påtagligt att belysning är en viktig hälso- och hållbarhetsfråga.

Ljus är livsnödvändigt och belysning är en grundläggande förutsättning för det moderna sättet att leva. De som inte har tillgång till belysning kan knappast arbeta efter mörkrets inbrott. I de ännu ej elektrifierade delarna av världen är det en grundläggande utvecklingsförutsättning att barnen får tillgång till belysning så att de kan läsa på kvällen. Belysning är grundläggande för säker trafik. Belysning är viktigt för människans möjlighet att vara produktiv på väldigt många olika sätt. Under detta projekt har jag också stött på mycket ny kunskap om att belysningens kvalitet är viktig för människans hälsa och välbefinnande.

När vi studerar belysningsteknologi och belysningsförhållanden bör vi tänka på nyttan för oss människor. Ljuset eller ljusstrålningen är inte enbart viktigt för att vi ska kunna se. Det påverkar hela kroppens vakenhet, välbefinnande och prestation. Trots att miljön ligger många varmt om hjärtat är det ändå så att belysning och belysningssystem skapas för att tillfredställa människans olika behov. Om vi glömmer detta då vi konstruerar och för in ny belysning på marknaden kan det leda till missnöje som försvårar för ny belysningsteknologi att ta sig in på marknaden. Belysningsteknologiutveckling som kan ha positiva effekter för såväl miljön som människans välbefinnande.

Då jag förberedde exjobbet funderade jag mycket på hur man kan beskriva ljusmängder på ett rättvisande sätt. Under Energimyndighetens kursvecka på Light Research Center vid Rensselaer Polytechnic Institute, NY berättade jag om mitt exjobb för Anne Andersson från SP. Anne föreslog att jag skulle titta på hur mycket energi ljuskällorna ger inom olika våglängdsområden. Det gav en bra startpunkt för mitt arbete med den här rapporten.

2. Bakgrund

2.1 Ecodesigndirektivet och utfasningen av glödlampan

Av den el som används i ett hushåll går upp till en fjärdedel åt till belysning. Glödlampan är en värmestrålare där mindre än 10 procent blir synligt ljus. På marknaden finns ny teknik som är betydligt mer energieffektiv och således har det beslutats att alla EU-länder ska fasa ut glödlampan, i flera steg. Hösten 2009 började utfasningen av glödlampan.

Som ett första steg bör följaktligen alla glödlampor bytas ut. I ett andra steg bör äldre lysrörsarmatur, så kallad T8-armaturer, bytas ut mot moderna lysrörsarmaturer, så kallade T5-armaturer. På så vis kan vi spara mycket energi då moderna belysningsystem oftast är avsevärt mer energieffektiva än de äldre. Livstiden är dessutom längre och de innehåller väsentligt mindre mängd kvicksilver (Belysningsbranschen, 2011). Då man ersätter gamla järndrosslar med moderna drivdon slipper man också det 100-periodiga flimmer som är stressande på ett negativt sätt, trots att man normalt inte ser att det flimrar.

2.2 Den nya teknikens möjligheter

Med dagens möjligheter att styra belysningen efter behov; med dimfunktion, dagsljusavläsning och närvarostyrning kan ytterligare energi sparas. Den nya belysningstekniken är en djungel; halogenglödlampor, lågenergi-, plasma-, induktions-, hps-lampor och inte minst LED utlovar fantastiska möjligheter för framtiden. Utvecklingen och introduktionen av nya produkter på marknaden sker hela tiden (Belysningsbranschen, 2011).

De som utvecklar ny teknik säger att det finns stora möjligheter att skapa det ljus vi önskar om vi ”bara” kan tala om vad vi vill ha. Det kan låta enkelt, men det är svårt att veta vilket ljus man bör eftersträva. Det finns mätetal, men de är svåra att förstå. Det är svårt att mäta och att bedöma hur bra en ljuskälla är.

Jag vill försöka mäta ljuset, med förhoppningen om att jag utöver att ge en jämförande bild av de olika ljuskällorna ska kunna bidra till utvecklingen av ljusbegrepp och mätmetoder.

3. Syfte

Syftet är att klargöra vilken form av målbild man bör använda vid utveckling och val av eko-effektiva ljuskällor. Rapporten jämför eko-effektiviteten för plasma-, HPS-, och induktionslampor. Avsikten är att rapportens arbetsmetod skall kunna användas som vägledning för arbete med val av eko-effektiva ljuskällor.

2.1 Avgränsningar

I denna rapport fokuserar jag på elförbrukningen (W) som huvudsakligt miljöbelastningsmått, i relation till ljusmängden (lm) som funktionell enhet. Jag har inte räknat om elmängden till grundläggande indirekta miljöbelastningar. Jag har inte heller inventerat vilka resursvolymmer som krävs för att få fram materialen till produkterna och jag har inte inventerat ljuskäلتillverkningens energianvändning. Jag har inte analyserat restmaterialhanteringen utan nöjer mig med att lista de miljömässigt problematiska materialen.

Rapporten fokuserar på totala ljusmängden. Jag försöker i princip summera effekten för alla riktningar, för att få ett mått på ljuskällans totalt emitterade ljusmängd. Det bör här noteras att det i en del tillämpningar kan vara fördelaktigt med riktat ljus. Jag har dock inte studerat sådana rumsliga fördelningsaspekter.

4. Metod

Arbetet inleddes med att jag studerade hur metoderna för livscykelanalys bör tillämpas för ljuskällor. Jag noterade att litteraturen kring ekoeffektivitet betonar att det är grundläggande att välja produkter som fungerar bra för användaren (IIIEE, 2011). För att kunna bedöma vilka ljuskällor som är bra studerade jag de allmänt använda metoderna för att beskriva och mäta ljusmängd och ljuskvalitet.

För att förbättra min förståelse för hur man kan arbeta med olika former av ljusrelaterade mätningar har jag besökt Light Research Center vid Rensselaer Polytechnic Institute, NY och Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, SP i Borås.

För att kunna mäta ljusmängder är det påtagligt att man måste integrera både rumsligt och över ljuskällornas spektralfördelningar. Tillgången på instrument gjorde att jag valde att mäta ljusmängden i lumen och kompletterade detta med att mäta ljuskällornas spektralfördelning. Spektralfördelningarna användes sedan tillsammans med de standardiserade kurvorna för ögats fotopiska och skotopiska känslighet för att beräkna korrigerade ljusmängdsvärden. Den fotopiska kurvan beskriver ögats spektrala känslighetsfördelning för relativt höga ljusnivåer, dagsljusseende, som bygger på tapparnas funktion. Den skotopiska kurvan beskriver ögats spektrala känslighetsfördelning för låga ljusnivåer, mörkerseende, som huvudsakligen bygger på stavarnas funktion och då man inte ser färg.

För att mäta den totala ljusmängden från en ljuskälla bör man egentligen använda ett Ulbrichtklot så att man får ett mått på den totala ljusmängden. Jag hade inte tillgång till något tillräckligt stort Ulbrichtklot utan har istället ställt upp ljuskällorna i ett mörkt rum och gjort lumenmätningar i fem positioner runt ljuskällorna. För att kalibrera mina lumenmätningar

gjorde jag mätningar för en lysrörslampa både i ett litet Ulbrichklot och i den försöksupställning jag använde för de stora ljuskällorna.

Samtidigt som jag mätte ljuskällornas ljusmängder mätte jag också deras elförbrukning. Denna mätning inkluderar drivkretsarna för ljuskällorna. I en mer komplett utredning bör man studera effektfaktorn, eftersom den påverkar nätets överföringskapacitet. I viss mån har jag mätt elförbrukningens effektfaktor, men för denna rapport har jag sedan valt att inte gå vidare med att analysera den aspekten. Som huvudsakliga mått på ekoeffektivitet har jag sedan beräknat kvoter mellan de olika lumenvärdena och elförbrukningarna.

Rapportens information om de olika ljuskällorna har en startpunkt i produktbladens information om de olika produkterna. Informationen om miljöbelastning i anknytning till de material som ingår i ljuskällorna och drivkretsarna är baserad på informationssökning i det mycket spretiga material som finns i litteraturen och på nätet. För att rimlighetsbedöma information har jag relaterat till teoretisk information om hur lamporna fungerar och visuella studier av hur ljuskällorna och drivkretsarna ser ut.

För att klargöra hur målbilden för att bedöma ekoeffektivitet för ljuskällor bör utformas har jag studerat spektralfördelningar och olika former av ljusmängdsvärden.

5. Teori

De senaste 20 åren är det många som har betonat att det är viktigt att hantera miljöarbetet på ett sådant sätt att vi får fram produkter och lösningar som fungerar bra för användarna. Det är lika viktigt att dubblera nyttan som att halvera miljöbelastningen (Weizsäcker m.fl., 1997).

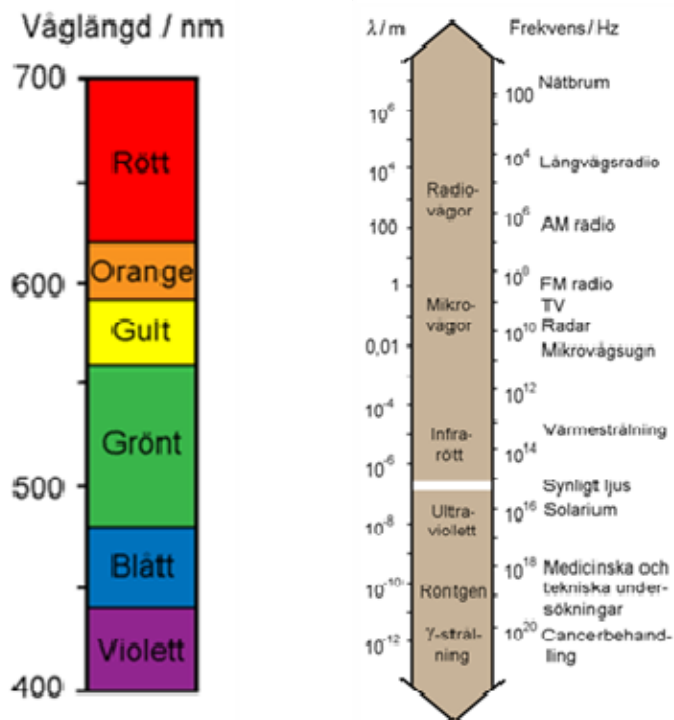
När man gör livscykelanalyser av produkter är det lika viktigt att analysera hur stor produktens nytta är som det är att analysera dess miljöbelastning. Det är viktigt att förstå nyttosidan och här inleder jag därför med en analys av ljus och ljuskällor.

5.1 Vad är ljus?

Ljus kan beskrivas antingen som partiklar (fotoner) med rörelsemängden $p = \frac{h \times \nu}{c}$ eller som vågor med våglängden $\lambda = \frac{c}{\nu}$ där ν är frekvensen, λ våglängden, c är ljushastigheten (konstant, 300 000 km/s) och h är Planck's konstant. **Vågrörelsemodellen** används för att beskriva fysikaliska fenomen såsom brytning, böjning och interferens. Då fotonens energi är avgörande, dvs. då man vill beskriva den enskilda fotonens växelverkan med en atom eller en molekyl används **fotonmodellen**. Det handlar då om fotoelektriska, fotokemiska eller fotobiologiska förlopp.

Ljusets våglängd beskriver ljusets energiinnehåll. Våglängden kan skrivas som kvoten mellan ljusets utbredningsfart c och frekvensen ν . Synligt ljus består av en liten del av det elektromagnetiska spektrat, mellan infraröd och ultraviolett strålning. Vad som skiljer den här delen av det elektromagnetiska spektrat från resten är att strålning i den här regionen absorberas av fotoreceptorerna i det mänskliga visuella systemet (LRC, 2011). För synligt ljus motsvarar

olika våglängder olika färger. Våglängden för blått ljus är kortare än för rött ljus. I figuren ser vi att synligt ljus består av våglängder mellan 400 och 700 nanometer.



Figur 1. Visar den synliga delen av det elektromagnetiska spektrat med våglängder mellan ca 400 och 700 nm. Till höger hela det elektromagnetiska spektrat (Karlsson m.fl., 2011).

5.2 Vad är ett plasma?

Då en gas värms upp till tillräcklig temperatur separeras elektroner från atomkärnan och ett plasma bildas. Plasmastillståndet är således en gasblandning av positiva joner och elektroner.

Plasmat kan vara fullt joniserat, som plasmat delvis är i solen och dess korona; eller partiellt joniserat som i fluorescerande lampor, som innehåller en stor del neutrala atomer. Plasmastillståndet genereras från det faktum att vi har ett stort antal laddade partiklar som interagerar genom elektriska krafter. Plasmastillståndet kan reagera på ett kollektivt sätt. Därför är plasmamediet mer än summan av dess beståndsdelar.

Vad är då skillnaden mellan en neutral gas och ett plasma? I en neutral gas interagerar partiklarna endast vid en kollision, dvs. när två gasatomer ”känner” av den korta räckvidden från Wan der Waals krafterna. Mestadels rör sig gasatomerna på en rak väg oberoende av de andra atomerna. Så fungerar det inte i ett plasma. Coulomb kraften som beskriver den elektrostatiska interaktionen avtar långsamt, vilket gör att den har lång räckvidd. Detta betyder att varje plasmapartikel interagerar med ett stort antal andra partiklar. Plasmat uppvisar således en samtidig respons för många partiklar till ett yttre stimuli (Piel, 2010).

5.3 Ögat

Ögat är ett komplext sinnesorgan som uppfattar de rumsliga och tidsmässiga relationerna mellan objekt i den synliga rymden. Ljusets energi omvandlas till elektriska signaler som bearbetas i ett neuralt nätverk i omedelbar anknytning till ögat och hjärnan.

I näthinnan finns tre typer av ljuskänsliga celler – tappar, stavar och de retinala gangliocellerna. De har samma uppbyggnad och metabolism, men olika funktioner. Deras olika roller betingas av att känsligheten för ljus som funktion av våglängd skiljer sig mellan dem (Kitsinelis, 2011). *De olika typerna av seende beskrivs ofta med den så kallade $V(\lambda)$ -funktionen, där ljus av olika våglängder viktas olika mycket. $V(\lambda)$ -funktionen och betydelse för ljusmätning diskuteras i 5.7.2.*

5.3.1 Färgseende och kontrast

Det finns tre olika typer av tappar och var och en av dem innehåller olika ljuskänsliga delar, med maxabsorbktion omkring 450, 550 och 600 nanometer. De kallas ofta blå, gröna och röda tappar efter den färg på ljuset de är mest känsliga för (Flesch, 2006). Förmågan att skilja mellan ljus av olika våglängder beror på en kombination mellan fotokemiska och neurologiska processer. Signaler från de tre typerna av tappar är kodade i näthinnan, till kromatisk (ex. rött, grönt och gult) och akromatisk information (svart, grått och vitt). Kromatisk, akromatisk, spatial och tidsmässig information kombineras icke-linjärt för att ge en slutgiltig uppfattning av ljus och färg.

Enbart ljusflödestätheten bestämmer inte uppfattningen av belysningsstyrka. Snarare är det den relativa ljusflödestätheten, eller kontrasten, mellan angränsande områden på retina som bestämmer dessa intryck. Ett litet område på näthinnan kan framträda som ljust eller mörkt beroende på illuminansen som faller på angränsande områden (Rea m.fl., 1993).

5.3.2 Bländning

Bländning är en känsla av obehag eller smärta som orsakas av hög eller icke-uniform distribution av ljusstyrka i synfältet. Obehag kan orsakas av att titta direkt på en intensiv ljuskälla eller genom att titta på en reflektion av ljuskällan från en speglade eller delvis speglade yta. Risken för bländning kan minskas genom att minska luminansen på ljuskällan eller öka bakgrundsluminansen kring ljuskällan (Rea m.fl., 1993).

5.4 Fysiska processer som ger ljus

Här vill jag beskriva huvudformerna för att producera ljus. Huvudsyftet är att diskutera vad det är som gör att det blir ett kontinuerligt spektrum och vad det är som gör att det blir toppar. För- och nackdelar med fullspektrumljuskällor (med kontinuerligt spektrum) diskuteras i kapitlet om Ljusets betydelse för det mänskliga välbefinnandet (5.9).

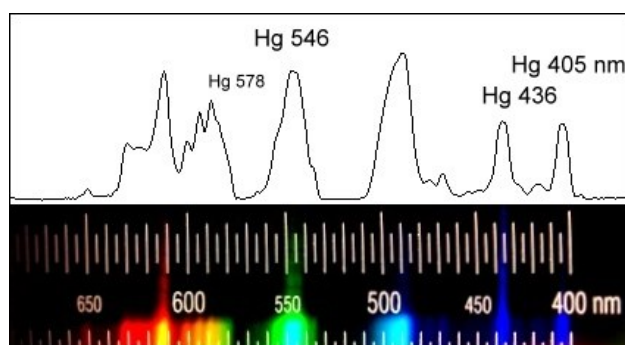
Om den ljusutsändande mekanismen bygger på att en exciterad atom går över från en högre till en lägre energinivå får man en foton med en viss energimängd som motsvarar skillnaden i energinivå. Alla fotoner som genereras från samma energigap får samma våglängd. Teoretiskt sett får man då ett spektrum med en bestämd våglängd.

De lyspulver som nu används i lysrör innehåller flera olika grundämnen och man tar nytta av många olika energigap, vilket gör att man får spektrum med flera olika våglängder. Varje specifikt energigap ger en topp i spektralfördelningen. Ljusemission som bygger på övergångar mellan olika elektronskal ger diskreta spektrum.

En annan form av ljusemitterande mekanism är att varma kroppar avger elektromagnetisk strålning, våd måttlig temperatur värme och infrarött och när de blir tillräckligt varma en växande andel synligt ljus. Den här mekanismen bygger på att materialets molekyler eller atomer på något sätt, genom termisk energi, vibrerar kring sina jämviktslägen. En del sådana vibrationsmekanismer kan utsända energi som fotoner, som kan ha vilken energimängd som helst, och man får då inga diskreta energinivåer på de emitterande fotonerna. Detta kan ge ett kontinuerligt spektra som innehåller fotoner på alla energinivåer inom det aktuella fallets intervall.

5.4.1 Ljuskällor med diskreta spektrum

Lysrör



Figur 2. Spektralfördelning för ett lysrör där man ser både topparna för kvicksilver och andra toppar för ljus från lyspulver. Återgiven från (http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Leuchtstoff_spektrum.jpg?uselang=sv).

Lysrör (och kompaktlysror) med kvicksilver och lyspulver är de mest kända exemplen på diskreta spektrum. I ett lysrör joniseras argon och kvicksilverångor så att det blir elektriskt ledande och UV-ljus skapas. UV-ljuset exciterar elektroner i det lyspulver som finns på glasrörets insida. Synligt ljus avges då den exciterade atomen återgår till ett lägre energitillstånd.

LED-lampor

Även spektrum för hps- och induktionslampan (som beskrivs i avsnitt 3.5) innehåller diskreta toppar.

Ljuset i en lysdiod, LED (Light emitting diode), skapas genom elektrisk excitation, dvs. elektronövergång från ett högre till ett lägre energitillstånd. Då detta sker sänds en foton (ett ljuskvanta) ut med en våglängd eller färg som motsvarar denna energiskillnad. Våglängden, som avgör ljusets färg, bestäms av halvledarens material (galliumarsenid och indiumnitrid är exempel på ämnen som kan finnas i halvledare). I en halvledare befinner sig varje atom på en bestämd position, dvs. den är uppbyggd som en kristall. Skillnader i brytningsindex, dvs. utbredningshastigheten hos fotonen i ett visst material, gör att fotonerna ofta studsar tillbaka in mot dioden och det effektiva ljusutbytet försämras.

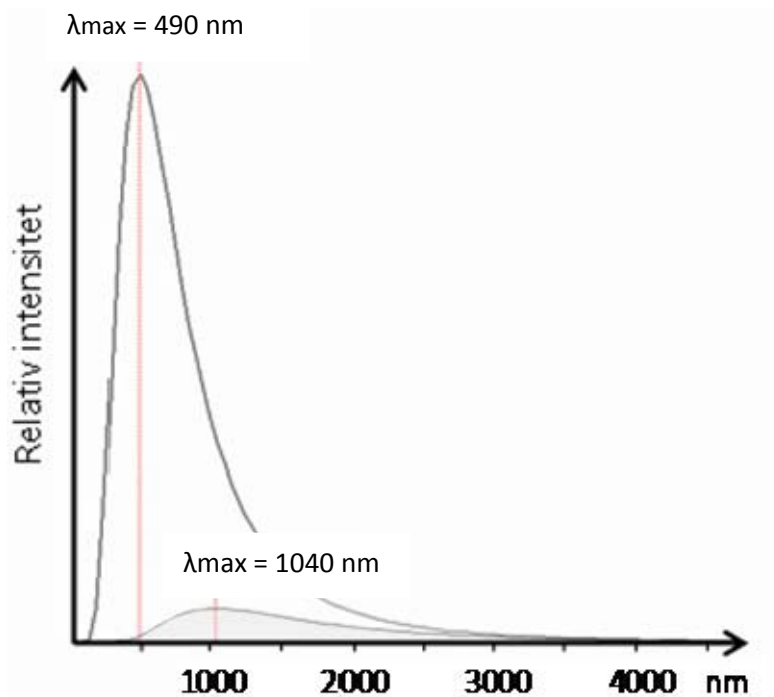
I dagsläget finns två huvudmetoder för att skapa vitt ljus med dioder. RGB-dioder är en typ av lysdioder som har tre former av dioder som ger röd, grön och blå för att få fram olika färgkombinationer eller få dioden att lysa vitt. Ett annat sätt att skapa vitt ljus är att utgå från UV-ljus och tillföra ett lyspulver (som fångar upp och transformerar till andra våglängder), som består av tunga grundämnen, till en blå LED (Ljuskultur, 2011).

5.4.2 Ljuskällor med kontinuerliga spektrum

Glödlampan och solen

Plasmalampan (som beskrivs i avsnitt 5.5.1) är ett annat exempel på en ljuskälla med kontinuerligt spektrum.

Solspektrum syns i figur 3 och vi kan se att det är ett kontinuerligt spektrum. Det mänskliga ögat är anpassat till solen och ljuskällor med en liknande spektralfördelning uppfattas därför ofta som ”bra ljus”. Men även en spektralfördelning ganska olik solens kan producera bra ljus med hänsyn till färgåtergivning om den matchar tapparna i det mänskliga ögat. Spektrat från solen kan jämföras med strålningen från en svartkropp. Svartkroppsstrålning på omkring 5800 K matchar solspektret bäst, men temperaturen beror starkt på betraktarens position på jordytan, höjden över havsytan, solens position (tiden på dagen), årstiden och väderförhållandena (Flesch, 2006).



Figur 3. Spektrets utseende för solen, respektive för en glödlampa. Återgiven från (Karlsson m.fl., 2011).

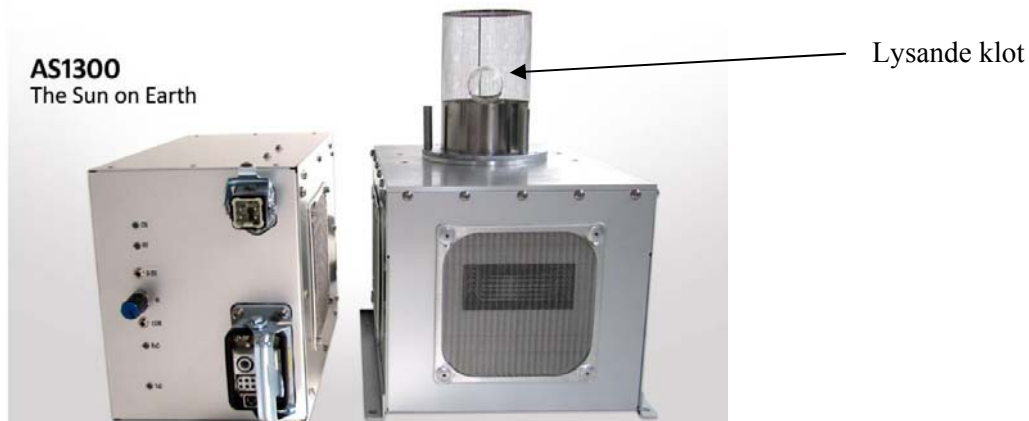
Den nedre kurvan i figur 3 visar spektret för en glödlampa. I glödlampan alstras ljuset genom att en glödtråd hettas upp av en elektrisk ström. Glödtråden måste således tåla hög temperatur och består därför i de flesta fall av volfram (andra ämnen som används till glödtråden är osmium, tantal och kol). Ju högre temperatur tråden tål, desto större del av den utstrålade effekten hamnar i det synliga området. Glödtråden är innesluten i en glaskolv och omgiven av en gasblandning med inerta gaser som finns där för att minska tillgången på ämnen som glödtråden kan reagera med. Om glödtråden kommer i kontakt med syrgas fattar den eld och förbränns på ett ögonblick. Elektriskt ledande trådar går från glödtrådens ändrar ut genom den metallsockel som glaskolven är festsatt i. Då ström leds genom glödtråden blir den varm, detta pga. att den fungerar som ett elektriskt motstånd. Glödtråden fungerar således som en approximativ svartkroppsstrålare som avger ljus och värme (Barnet m.fl., 1975).

5.5 De analyserade ljuskällorna

För att få en relevant jämförelse har jag valt att använda mig av lampor som fungerar till liknande applikationer. Lamporna jag har valt är av typerna:

- Plasmalampa: AS1300 Light Engine
- Induktionslampa: ett sk. No-name märke
- HPS: General Electrics 600W High Output HPS

5.5.1 Plasmalampa



Figur 4. Plasmalampa Återgiven från (<http://www.plasma-i.com/sulphur-plasma-light.htm>)

Den lampa som i denna rapport benämns plasmalampa benämns i andra sammanhang elektrodlös svavellampa. Den ljusemitterade funktionen bygger på att det finns svavel i ett runt kvartsklot som också innehåller argon. Energin tillförs med en magnetron, en mikrovågsgenerator som liknar den som finns i mikrovågsugnar. Varmt svavel har kraftigt oxiderande egenskaper och det fungerar därför inte att hetta upp ett svavelplasma genom att tillföra energi via elektroder.

Kvartsklotet med svavlet är inneslutet i ett trådnät som formar en elektromagnetiskt verksam ”bur” som leder fram mikrovågorna. Mikrovågorna hettar upp gasen som i sin tur hettar upp svavlet så att man får ett plasma som avger ett intensivt ljus (Wikipedia, 2011).

5.5.1 HPS-lampa



Figur 5. Återgiven från <http://www.swedish-growsystems.se/se/art/general-electrics-600w-high-output-hps.php>

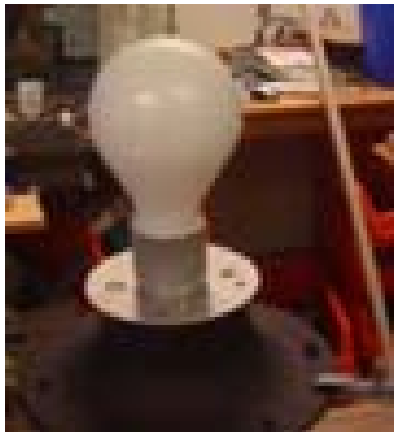
Ljuset i en HPS-lampa produceras genom en elektrisk urladdning genom en ånga av kvicksilver och natrium. Det är natrium som dominerar spektralfördelningen. Gaserna befinner sig i ett urladdningsrör under högt tryck. Urladdningsröret är i sin tur omgivet av en glaskula av hårdglas. Vanligtvis består urladdningsröret av en genomskinlig keram av aluminiumoxid. I varje ände av det cylindriska urladdningsröret hålls wolframelektroder på plats av en omslutande keram. Ballasten sänder ut högvoltpulser till lampan och då initieras en elektrisk urladdning mellan de två elektroderna. Pulserna pågår tills dess att en ljusbåge utvecklas. Urladdningsröret innehåller också små mängder xenon och producerar värme som gör att natriumet och kvicksilvret förångas.

På grund av Hps-lampornas elektriska karaktäristik behövs en serieimpedans, ballast, för att kunna starta och köra lampan. Ballasten måste vara kompatibel med den specifika lampan och nätspänningen som den är ihopkopplad med. Ballaster för Hps-lampor kan vara antingen magnetiska eller elektroniska, men magnetiska ballaster är den vanligaste typen. Vid energi-analyser måste tänka på hur mycket effekt hela systemet drar från nätet, dvs. lampa plus ballast när de utför energianvändningsberäkningar. Detta beror på att ballasten har relativt stor förlusteffekt under drift. Liknande gäller för de andra HID-ljuskällorna.

Hps-lampan har, jämfört med glödlampan, lång livslängd och hög effektivitet och har därför varit den mest använda HID (High Intensity Discharge) ljuskällan för utomhusbruk. Den används bland annat på gator, vägar och som säkerhetsbelysning. (Leistevuo m.fl., 2001)

5.5.2 Induktionslampa

I en induktionslampa (elektrodlös) genereras ljuset genom induktion (överföring av energi genom ett elektromagnetiskt fält) som driver en urladdning i glaskolven. Elektronerna rör sig mellan elektroderna, för att excitera kvicksilvret i gasen i glaskolven, som i sin tur exciterar det fosforiserande pulvret på väggen på glaskolven och producerar ljus. Systemet i induktionslampan drivs av en radiofrekvent strömtillförsel som skickar en elektrisk ström till en spole (en ledningstråd virad kring en plast- eller i vissa fall en metallkärna inuti lampan). Denna ström genererar ett elektromagnetiskt fält när den passerar genom induktionsspolen.



Huvudfördelen med att använda induktionsteknologin för att generera ljus är att, eftersom det inte finns några elektroder som försämras med tiden, är livslängden betydligt bättre. I fallet med induktionslampan är livslängden framförallt beroende av de elektroniska komponenterna i högfrekvensgeneratorn som förser lampan med ström, vilka ofta har kortare livslängd än lampan själv. (RPI, 2011)

Figur 6. Visar den induktionslampa som jag har gjort mina mätningar på.

5.6 Metodik för analys av ekoeffektivitet

Den viktigaste metoden för helhetsmässig miljöanalys av ljuskällor är livscykelanalys (LCA). Det är väl känt att en LCA bör inkludera alla miljöbelastningar från vaggan till graven. Det är många som har noterat att det är svårt att summera värderingar av olika former av miljöbelastningar på ett relevant sätt. Det är också viktigt att notera att miljöbelastningsvärdena måste kopplas till någon form av nyttomätning för att man skall få relevanta resultat, som t.e.x. ger möjlighet att jämföra olika produkter.

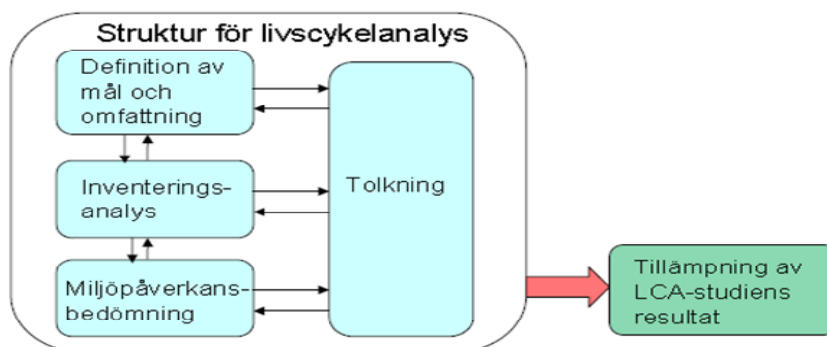
Standarden för LCA (ISO14040, 1997) fokuserar på kvoten:

$$\frac{\text{Miljöbelastning}}{\text{Funktionell enhet}}$$

Den funktionella enheten skall vara ett nyttomått som beskriver produktens viktigaste funktion. Standarden betonar att det är viktigt att vara tydlig med vad man analyserar och att göra en sådan tolkning (beskrivande förklaring) att resultatet blir begripligt, se Figur 7. För att få grepp på ljuskällornas funktionella nytta har jag analyserat det mänskliga värdet av olika former av ljus och mätt spektralfördelningar.

När det gäller ljuskällornas miljöbelastning är det elanvändningen som är den dominerande faktorn. Jag har mätt ljuskällornas effektförbrukning och gjort en sammanställning av de andra formerna av miljöbelastningar. *Specifika siffror och diagram för de olika ljuskällorna finns i kapitel 6 och kapitel 7.*

När det gäller elanvändningens miljöpåverkan är det för tillfället koldioxidutsläppen från elning av fossila bränslen som väcker störst intresse. Även andra former av elproduktion orsakar dock väsentliga miljöbelastningar.



Figur 7. Livscykelanalysens metodik (ISO 14040, 1997).

5.7 Att mäta ljus

Den optiska strålningen från en ljuskälla som faller på en yta reflekteras eller överförs genom ett material kan mätas rent fysiskt genom att mäta styrkan på strålningen (i watt), i allmänhet som en funktion av våglängden. Men sådana mätningar ger inte information om strålningens förmåga att stimulera synen. För att mäta den visuella effekten behöver vi ta hänsyn till den spektrala ljusverkningsgraden för det mänskliga visuella systemet. Två spektrala ljusutbytesfunktioner har definierats av Internationella belysnings-kommissionen (CIE), en som är anpassad till fotopiska förhållanden och en annan för skotopiska förhållanden och dessa två funktioner har antagits som en del av SI-systemet. I praktiken görs nästan alla belysningsmätningar med den fotopiska funktionen.

3.7.1 Color Rendering Index

Color Rendering Index är det vanligaste sättet att representera färgåtergivningsegenskaperna hos elektriska ljuskällor. CRI var avsett att karaktärisera hur "sant" eller "naturligt" objekt framstår när de belyses av en ljuskälla (dvs. inte färgen på själva ljuset utan färgen på objektet då det belyses av en specifik ljuskälla). För att avgöra om en ljuskälla har bra färgåtergivningsegenskaper jämför man med en idealkälla med "perfekt" färgåtergivning. CRI-värden ligger mellan 0 till 100 och en idealkälla har CRI-värdet 100. För att en ljuskälla ska vara jämförbar med en sådan idealkälla krävs det att den har samma färgtemperatur. Då man tar fram ett CRI-värde för en specifik ljuskälla väljer man således ut en idealkälla med liknande färgtemperatur. Några idealkällor med olika färgtemperaturer ses i tabell 1.

Ljuskälla	CRI	CCT (Correlated color temperature i grader K)
Sterinljus	100	1,700
Glödlampa	100	2,700
Naturligt solljus	100	5,000 to 6,000

Tabell 1. Ljuskällor med ideal färgåtergivning (<http://www.nachi.org/lighting-quality.htm>)

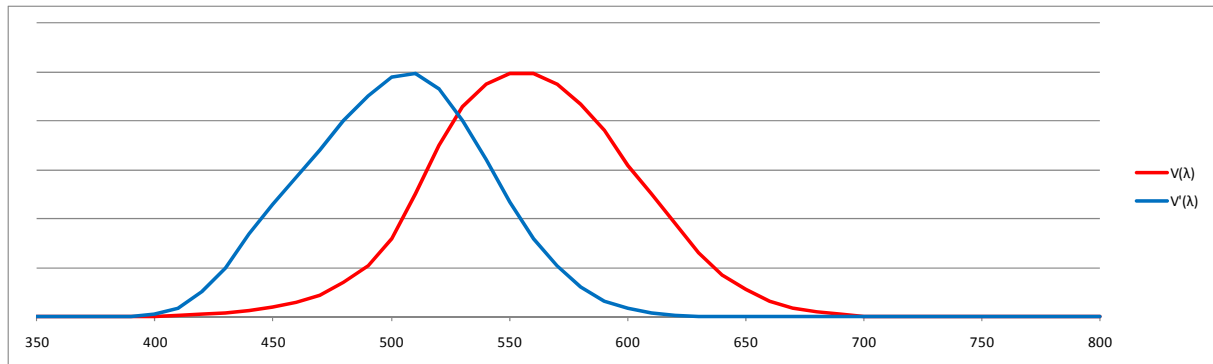
Det icke-kontinuerliga ljuset karaktäriseras av ett lägre CRI eftersom det inte innehåller alla färger. Kontinuerliga spektra som emitterar vid alla våglängder av det synliga spektret ser vita ut och karaktäriseras av det högsta CRI-värdet, eftersom alla färger kan avbildas med en sådan källa (Kitsinelis, 2011). *I avsnittet om Fysiska processer som ger ljus (5.4) gör jag ett försök att beskriva skillnaderna mellan ett kontinuerligt och ett icke-kontinuerligt spektrum.*

5.7.2 Fotopisk, skotopisk och mesopisk fotometri

Ett och samma strålningsflöde, uttryckt i watt, ger helt olika mängd upplevt ljus beroende på flödets spektrala fördelning, dvs. våglängds- eller frekvensfördelning. Detta beror på att ögats receptorer har olika känslighet för olika frekvenser. Effekten brukar visas i en kurva över ögats känslighet vid fotopiskt (dags-) seende, som standardiserats av den internationella belysningskommisionen, CIE. Kurvan kallas ofta **V(λ)-funktionen** och ska representera ögats spektralkänslighet. Under fotopiska förhållanden är ögats känslighet som störst vid 555 nm.

När luminansen minskar, skiftar känsligheten mot kortare våglängder. Känsligheten, under skotopiska (nattseende) förhållanden, är som störst vid 508 nm.

Fram tills nu har basen för nästan all fotometri varit $V(\lambda)$ -kurvan, som etablerades 1924. $V'(\lambda)$ -kurvan, ögats känslighetsfunktion i skotopiska förhållanden, etablerades 1951, men har knappast använts i praktisk fotometri. (Halonen m.fl., 2011)



Figur 6. Visar $V(\lambda)$, den fotopiska funktionen, respektive $V'(\lambda)$, den skotopiska funktionen. I avsnitt 4.3 diskuteras resultat i lumen/W i koppling till valet av ljuskänslighetskurva.

Den mesopiska (skymningsseendet) regionen täcker en bredd av luminanser mellan de skotopiska och fotopiska regionerna. Hittills har det inte funnits något internationellt accepterat system för mesopisk fotometri. Detta betyder att lämpliga metoder för att utvärdera den visuella effektiviteten för belysningsprodukter och installationer i den mesopiska regionen inte finns.

I den mesopiska regionen är den spektrala sensitiviteten för det mänskliga visuella systemet inte konstant, utan ändrar sig med ljusmängd. Detta beror på det varierande bidraget från stavar och tappar på näthinnan. Således behöver vi inte bara den mesopiska spektrala sensitivitetens funktion, utan istället flera funktioner, tillsammans med en definierad procedur för att använda dessa funktioner i ett fotometriskt mätsystem. Det nya mesopiska systemet beskriver spektralt ljusutbyte $V_{mes}(\lambda)$ i den mesopiska regionen, som en linjär kombination av den fotopiska spektrala ljusutbytesfunktionen $V(\lambda)$ och den skotopiska spektrala ljusutbytesfunktionen $V'(\lambda)$. För att tillämpa den mesopiska fotometrin, skotopisk/fotopisk – förhållandet, behövs ett inputvärde. Inputvärdet är förhållandet ljusutbytet uträknat enligt det skotopiska $V'(\lambda)$ ljusutbytet till det fotopiska $V(\lambda)$ ljusutbytet. Ju högre fotopisk/skotopisk – förhållandet är, desto högre är verkningsgraden för ljuskällan i termer av mesopisk design.

Då mesopisk dimensionering favoriserar vita ljuskällor med högt S/P (skotopisk/fotopisk)–förhållande får man vid användningen av en sådan bra färgåtergivningskaraktäristika för belysningen. Användningen av det nya mesopiska systemet för att räkna ut det effektiva ljusutbytet för dessa vita ljuskällor resulterar i signifikanta ändringar i deras beräknade verkningsgrad. Det kommer att ge tillverkare en grund för att utveckla ljuskällor som är optimerade för applikationer där man har låga ljusnivåer (Halonen m.fl., 2011).

5.8 Mätinstrument

Följande mätinstrument har använts i undersökningen:

- **Integrerande sfär:** Fysiska Institutionens (vid Lunds Universitet) egna
- **Ljushmätare:** Hagner Universal Photometer S4
- **Spektrometer:** Ocean Optics USB 2000
- **Effektmätare:** PM300 energy meter ETECH
- **Effektmätare:** Sampling VAW METER, MODEL 2330, Clarke Hess

5.8.1 Integrerande sfär



En integrerande sfär, även kallad Ulbricht sfär är en optisk enhet med ett flertal användningsområden, främst att mäta ljusflöde från en ljuskälla, t.ex. glödlampa, halogenlampa eller en LED-lampa (light emitting diode=lysdiod), eller att mäta spridningsförluster från en yta. Det är en ihålig sfär med en diffust reflekterande inre yta, typiskt sett två eller fler små öppningar (portar) för att släppa in ljus och att fästa en fotodetektor och ofta några ljusbarriärer som används för att motverka direkt belysning av en detektor från en ljuskälla. Arrangemanget orsakar många diffusa reflektioner av det introducerade ljuset innan det når detektorn, och gör resultatet nästan oberoende av de rumsliga och polariseringsegenskaperna av det introducerade ljuset. På det sättet kan det totala ljusflödet från en ljuskälla mätas, även om divergensen är ganska stor.

Idealt, har beläggningen på insidan av den integrerande sfären en hög reflektionsförmåga över det önskade våglängdsområdet, och reflektionen är diffus. Om de optiska förlusterna i en sfär och genom de små portarna är små, kan de multipla reflektionerna leda till ganska hög intensitet inuti sfären och således också till en hög optisk effektivitet, även om sfären är mycket större än ljuskällan och detektorn (Bergman m.fl. 2001).

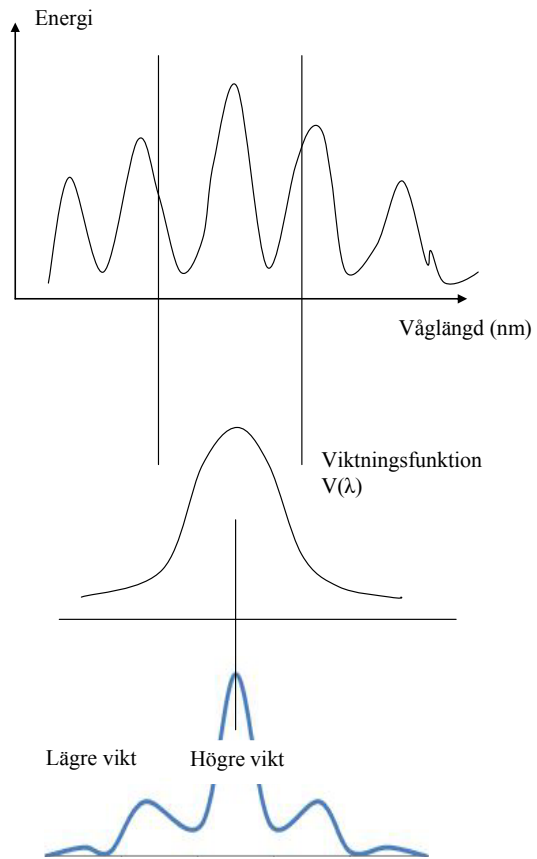
5.8.2 Lumenmätning

För att mäta ljusmängden i lumen multipliceras den spektrala fördelningen av ljusenergi med en viktningskurva, enligt Figur 9.

Viktningen i figuren innebär att den centrala toppen i den övre spektralfördelningen viktas med en hög faktor. Sidotopparna som ligger på viktningsfunktionens flanker viktas med en väsentligt lägre faktor. De yttre sidotopparna ges en mycket låg vikt, vilket innebär att de knappast ger några bidrag till det resulterande lumenvärdet.

Ljusbätaren som mäter ljusflöde i lumen eller lux har den här formen av viktningsfunktion inbyggd som en del i mätmetoden. Viktningen kan göras med ett ingångsfiltet som släpper igenom ljuset vid de våglängder som ligger vid $V(\lambda)$ -kurvans topp och som samtidigt dämpar ljuset med kortare och längre våglängder. Nästan all energin i ljuset vid $V(\lambda)$ -kurvans topp släpps fram till fotocellen medan bara en mindre del av energin i ljuset vid andra våglängder släpps fram till fotocellen.

Den nedre kurvan visar produkten av de två övre och arean under den nedre kurvan är proportionell mot lumenvärdet.



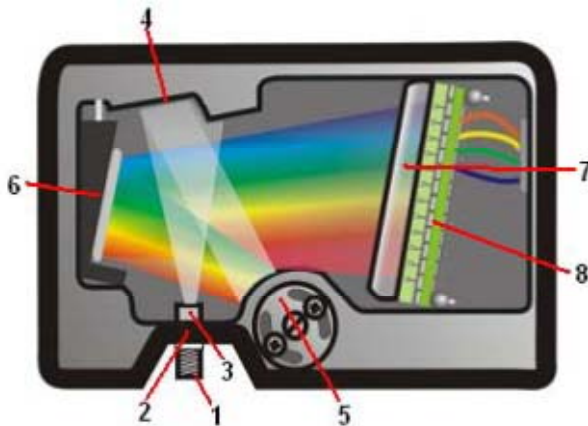
Figur 9. Lumenmätningens metod för viktning av energimängderna vid olika vågläng-

5.8.3 Spektrometern



Figur 7. Spektrometern USB 2000. Bild från Operating Instructions, (www.oceanoptics.com/technical/USB2000%20Operating%20Instructions.pdf)

För att mäta ljusintensitet som funktion av våglängd behöver man ett instrument som delar upp ljuset i olika våglängder och mäter energimängden eller antalet fotoner för de olika våglängderna (våglängdsområdena). Uppdelningen av ljuset kan göras med ett prisma eller ett gitter. Figur 7 visar principen för hur en spektrometer fungerar.



1	SMA kontakt	Anslutning för ljusledare
2	Spalt	Spalt som styr mängden ljus som släpps in i spektrometern
3	Filter	Begränsar mängden ljus inom olika våglängdsområden.
4	Kollimator	Spegel som riktar ljuset till ett knippe av parallella strålar mot spektrometers gitter.
5	Gitter	Gitter som böjer ljuset mot den fokuserande spegeln.
6	Spegel	Fokuserar ljuset från gittret på CCD-sensors lins
7	Lins	Fokuserar ljuset på CCD-sensorerna
8	CCD	Elektronisk halvledarbricka som omvandlar fotoner till elektriska laddningar.

Figur 8. Beskrivning av spektrometer. Översatt från: USB2000, Fiber Optic Spectrometer, Installation and Operation Manual, Ocean Optics Inc.

5.9 Ljusets betydelse för det mänskliga välbefinnandet

Ljus är väsentligt för upplevelsen av de rum vi vistas i. Det finns flera viktiga aspekter, utöver att man skall kunna se det man arbetar med. Generellt vill vi ha ganska mycket ljus, men inte för mycket. Studier visar att belysningsstyrkan bör väljas med hänsyn till ett flertal faktorer, inte minst uppgiften som skall utföras och åldern på användaren (Rea m.fl., 1993)

Cirkadiska rytmer är rytmer som repeterar sig själva var 24:e timme. Dessa inkluderar cykler såsom sömn/vakenhet, kroppstemperatur, hormonproduktion och alerthet. Ljus är huvudinput för att synkronisera den biologiska klockan till en 24 timmars dygnsrytm. Om vi inte exponeras för tillräckligt mycket ljus med rätt spektrum, under tillräckligt lång tid och vid rätt tidpunkt blir vår biologiska klocka osynkroniserad med dygnet och de biologiska funktionerna.

Störningar i den cirkadiska rytmen kan resultera i dålig sömn, till följd av en underproduktion av melatonin. Melatonin är ett hormon som produceras av tallkottkörteln på natten och under mörka förhållanden. Melatonin är det hormon som talar om för kroppen när det är natt och dags att sova. Störningar kan också leda till matsmältningsbesvär och reducerad uppmärksamhet och prestationsförmåga. Över tiden kan dessa störningar leda till allvarliga sjukdomar, såsom kardiovaskulära sjukdomar, diabetes, övervikt och cancer. Träning, sociala aktiviteter och schemalagda måltider har också visat sig synkronisera klockan, men deras inverkan på de cirkadiska rytmerna är svagare än ljus. (Figueiro, 2003).

Trots vetenskapen om de negativa effekterna av störningar i de cirkadiska rytmerna på hälsan vet vi förhållandevis lite om hur olika levnadsförhållanden påverkar de cirkadiska rytmerna (D Miller, 2010).

5.9.2 Fullspektrumljuskällor

Vi har till sist börjat förstå att ljus, är en näringskälla precis som mat och precis som att en obalanserad kost kan göra oss sjuka så kan en felaktig belysning göra oss sjuka, och rätt belysning kan bevara vår hälsa. Forskning inom detta område har gjort stora framsteg, men det är fortfarande en lång väg kvar att gå.

Dr. John Ott

Termen fullspektrum myntades på 1960-talet av fotobiologen Dr. John Ott för att beskriva elektriska ljuskällor som simulerar synligt och ultraviolett (UV) spektrum hos dagsljus. Fullspektrum är inte en teknisk term utan snarare en marknadsterm som antyder en jämn och kontinuerlig spektralfördelning (SPD). Plasmalampan marknadsförs som en fullspektrumljuskälla där spektrumet i stort liknar det vi får från solen.

Tillverkare av fullspektrumljuskällor bedyrar en mängd fördelar med deras produkter; bättre synlighet, förbättrad färgåtergivning, bättre hälsa och större produktivitet.

Fullspektrumljuskällor och färguppfattning. Färg är en mänsklig uppfattning konstruerad från kombinationen av ljuskällans verkningsgrad, spektralfördelning, spektrala reflektansen för materialet som belyses och den tri-kromatiska naturen hos det mänskliga synsystemet. Om det finns luckor eller stora variationer i spektralfördelning för en ljuskälla finns det risk för sammanblandning mellan de synliga färgerna hos objekt. Så, när färgidentifikation är en del

av den visuella uppgiften, såsom för grafisk konst eller färgutskrift-applikationer, ger fullspektrum ljuskällor god möjlighet att skilja färger åt. Fullspektrumljuskällor ger utmärkt färgåtergivning. Color rendering index (CRI) siffror för fullspektrumljuskällor är typiskt större än 90.

Fullspektrum ljuskällor och hälsa. Det är inte självklart att fullspektrumljuskällor kommer att ge bättre hälsa än andra elektriska ljuskällor. Forskning visar att de mänskliga dagliga aktiviteterna är starkt influerade av solens ljus/mörker-cykel. Ljus är den mest effektiva yttre stimuli för att reglera dessa cirkadiska cykler och synkronisera dem till 24-timmars dygnet. Korta våglängder (blått) ljus är speciellt effektivt för att reglera det cirkadiska systemet. Långa våglängder (rött) ljus är mindre betydelsefullt för det cirkadiska systemet. För att maximera verkningsgraden i påverkan på det cirkadiska systemet ska en ljuskälla inte härma ett fullspektrum, utan istället ha variabel SPD (dock är cirkadiska rytmer inte det enda man bör ta i beaktande).

Fullspektrumljuskällor och psykologiska verkningar. Fullspektrumljuskällor kan ha psykologiskt positiva effekter, speciellt i samhällen som sätter värde på ”naturliga” omgivningar. Ett av skälen som anges för att välja fullspektrum är att de liknar dagsljus. Men till skillnad från elektriska ljuskällor med fullspektrum har dagsljus inte ett bestämt spektrum. Det varierar med latitud, tid på dagen, årstid, molnighet, luftföroreningar, markreflektion och fönstertyp.

Vissa fullspektrumlampor förespråkas för att de producerar ultraviolett strålning. Detta kan tyckas märkligt då man generellt bör undvika UV-strålning. UV-strålning bleker och förstör arkitektoniska material och UV i höga doser är skadligt för huden och ögonen. Däremot kan hudexponering för ett ganska smalt band av UV strålning, UVB mellan 290 och 315 nm främja syntes av D vitamin, vilket är nödvändigt för utveckling och underhåll av ben (NLPIP, 2005).

5.9.1 God belysningsmiljö

Mätningar ger oss ett ramverk inom vilket vi kan kvantifiera egenskaper hos föremål, material, miljöer eller beteenden på ett objektivt och reproducerbart sätt. I fråga om ljus och belysning måste mätramen stödja två huvudsakliga mål: en effektiv användning av ljus för att optimera mänskliga prestationer, hälsa och välbefinnande och en effektiv energianvändning. För att vi ska uppnå dessa mål måste våra nuvarande metoder för mätning på detta område expandera till att omfatta aspekter såsom påverkan av ljus på hälsa och välbefinnande och den upplysta miljön som helhet, inklusive betydelsen av dagsljus och hur detta påverkar humör och beteende. Det är inte längre tillräckligt att prata om belysning bara i termer av belysningsstyrkan på arbetsbordet eller färgåtergivning. Vi måste bredda våra mätskalor och instrument för att möjliggöra en mer omfattande beskrivning och analys av vår visuella värld (RPI, 2011).

Dagsljus är erkänt som ett viktigt element i arkitektur och en användbar strategi i energieffektiva byggnadskonstruktioner. Dagsljus anses vara den bästa ljuskällan för färgåtergivning och dess kvalitet gör att det är den ljuskälla som bäst matchar den mänskliga visuella responsen (Li, 2010). Dagsljuset, liksom plasmalampan är fullspektrumljuskällor.

Ett exempel på en lyckad ljussättning är Matildelunds förskola i Kumla som vann svenska ljuspriset 2009. Tack vare det unika engagemanget i barnets behov av en god miljö för inlärning och lek kammade bidraget hem vinsten. Dagsljuset står i centrum och det artificiella ljuset fungerar som ett komplement som bidrar till trivsel, hemkänsla, lek och upplevelser. Ljuset är anpassat för varierande verksamhet och syftar till att lyfta fram rummets kvalitéer. Tekniken är inte särskilt avancerad och lösningarna är enkla (Ceebel, 2010).

6. Resultat

6.1 Lumen/Watt

Från början var tanken att jag skulle mäta på lamporna i den integrerande sfären, men då de lampor jag skulle mäta på var för stora fick jag använda mig av en annan metod. Idealiskt vore att mäta på ett oändligt antal punkter runt om lampan i ett mörkt rum utan reflektion. Då detta av praktiska skäl inte var möjligt fick jag nöja mig med att ta upp fem mätpunkter runt om lampan; fyra punkter fördelade jämnt runt om sfären och en rakt ovanför. För att kalibrera mätvärdena använde jag mig av en lågenergilampa som jag först placerade i sfären(1) och sedan på det sätt som beskrivs ovan(2).

6.1.1 Kalibreringsmätning med lågenergilampa:

1. Jag mätte upp belysningsstyrka och effekt under ca 30 min tills mätvärdena stabiliserat sig, på fyra olika platser i sfären (för att kontrollera att mätvärdena i sfären var tillräckligt stabila): 1655, 1627, 1658 och 1630 lumen/m²

$$\text{Medelvärde: } (1655 + 1627 + 1658 + 1630)/4 = 1642,5 \text{ lumen/m}^2$$

$$A = 23,5^2 \times 4\pi \approx 6936 \text{ cm}^2 = 0,6936 \text{ m}^2$$

Totalt ljusflöde från ljuskällan:

$$\text{Reflektans} = \rho = 0,79$$

$$\text{Totalt ljusflöde} = \Phi$$

$$\text{Belysningsstyrka} = E$$

$$\Phi = (E(1 - \rho) \times 4\pi R^2)/\rho = (1642,5(1 - 0,79) \times 4\pi \times 0,235^2)/0,79 \approx 303 \text{ lumen}$$

2. Jag mätte upp belysningsstyrka och effekt under ca 30 min tills mätvärdena stabiliserat sig, vilket resulterade i följande värden på illuminansen: 158, 200, 195, 205 och 201 lumen/m²

$$\text{Medelvärde: } (158 + 200 + 195 + 205 + 201)/5 = 191,8 \text{ lumen/m}^2$$

$$A = 0,42^2 \times 4\pi \approx 2,2156 \text{ m}^2$$

$$\text{Totalt ljusflöde från ljuskällan: } 191,8 \text{ lumen/m}^2 \times 2,2156 \text{ m}^2 \approx 425 \text{ lumen}$$

Som vi ser är värdet på ljusflödet för mätning 2 högre än för mätning 1. Troliga orsaker:

- Reflekerat ljus från väggar och möblering ger en ökning av det uppmätta ljuset.
- Då ljusmängden nedanför lampan är mindre än den är ovanför, och jag har räknat på hela sfären, blir det beräknade ljusflödet större än ljusflödet egentligen är. Felvärdet kan minska om jag räknar bort en del av underdelen på sfären: $(5/6) \times 425 \approx 354$ lumen. Men då jag söker förhållandet mellan det uppmätta värdet i sfären och det i rummet har det inte någon egentlig betydelse.

Jag beräknar istället en konstant att multiplicera med värden på ljusflödet för HPS-, induktions- och plasmalampa.

$$303/425 = 0,713$$

6.1.2 Plasmalampa

Plasmalampan är dimbar och jag mätte upp ljusflöden för tre olika nivåer på dimmern:

1. 820, 930, 910, 930 och 2840 (tak) lumen/m²

$$\text{Medelvärde: } (820 + 930 + 910 + 930 + 2840)/5 = 1286 \text{ lumen/m}^2$$

$$A = 0,71^2 \times 4\pi \approx 6,3315 \text{ m}^2$$

Totalt ljusflöde från ljuskällan: $1286 \text{ lumen/m}^2 \times 6,3315 \text{ m}^2 \approx 8142 \text{ lumen}$

Korrigerat värde: $8142 \times 0,713 \approx 5805 \text{ lumen}$

Effekten mättes upp: 409, 410, 410, 410 och 409

$$\text{Medelvärde: } (409 + 410 + 410 + 410 + 410)/5 \approx 410 \text{ W}$$

Ljusflöde/effekt: $5805/410 \approx 14 \text{ lumen/W}$

2. 8840, 9900, 9850, 9840 och 18400 (tak) lumen/m²

$$\text{Medelvärde: } (8840 + 9900 + 9850 + 9840 + 18400)/5 = 11366 \text{ lumen/m}^2$$

Totalt ljusflöde från ljuskällan: $11366 \text{ lumen/m}^2 \times 6,3315 \text{ m}^2 \approx 71964 \text{ lumen}$

Korrigerat värde: $71964 \times 0,713 \approx 51310 \text{ lumen}$

Effekten mättes upp: 875, 864, 878, 875 och 877

$$\text{Medelvärde: } (875 + 864 + 878 + 875 + 877)/5 \approx 874 \text{ W}$$

Ljusflöde/effekt: $51310/874 \approx 59 \text{ lumen/W}$

3. 19000, 20800, 20900, 20900 och 35200 (tak) lumen/m²

Medelvärde: $(19000 + 20800 + 20900 + 20900 + 35200)/5 = 23360$ lumen/m²

Totalt ljusflöde från ljuskällan: $23360 \text{ lumen/m}^2 \times 6,3315 \text{ m}^2 \approx 147904$ lumen

Korrigerat värde: $147904 \times 0,713 \approx 105455$ lumen

Effekten mättes upp: 1407, 1399, 1411, 1405 och 1400 W

Medelvärde: $(1407 + 1399 + 1411 + 1405 + 1400)/5 \approx 1404$ W

Ljusflöde/effekt: $105455/1404 \approx 75$ lumen/W

6.1.3 High Pressure Sodium:

Jag mätte upp belysningsstyrka och effekt under ca 30 min tills mätvärdena stabiliserat sig, Av praktiska skäl var det svårt att mäta på en stående lampa och jag har därför inte mätt på samma sätt som jag gjort för de andra lamporna. Jag har därför bara två sidomätvärden, 10690 och 11190 lumen/ m², jämfört med fyra för de andra lamporna. Liksom för de andra lamporna har jag ett takmätvärde, 2230 lumen/m².

För att beräkna ett totalmedelvärde som är jämförbart med de andra lamporna räknar jag med dubbel vikt för sidomätvärdena:

$$((10690 \times 2) + (11190 \times 2) + 2230)/5 = 9198 \text{ lumen/m}^2$$

$$A = 0,9625^2 \times 4\pi \approx 11,6332 \text{ m}^2$$

Totalt ljusflöde från ljuskällan: $9198 \text{ lumen/m}^2 \times 11,6332 \text{ m}^2 \approx 107003$ lumen

Korrigerat värde: $107003 \times 0,713 \approx 76293$ lumen

Effekten mättes upp:

Lampa och ballast: 625 watt

Enbart lampan: 588 watt

Ljusflöde/effekt: $76293/625 \approx 122$ lumen/W

6.1.4 Induktionslampa:

Jag mätte upp belysningsstyrka och effekt under ca 30 min tills mätvärdena stabiliserat sig, vilket resulterade i följande värden på belysningsstyrkan: 4800, 4840, 4810, 4820 och 4830 lumen/m²

Medelvärde: $(4800 + 4840 + 4810 + 4820 + 4830)/5 = 4820$ lumen/m²

$$A = 0,44^2 \times 4\pi \approx 2,4316 \text{ m}^2$$

Totalt ljusflöde från ljuskällan: $4820 \text{ lumen/m}^2 \times 2,4316 \text{ m}^2 \approx 11740$ lumen

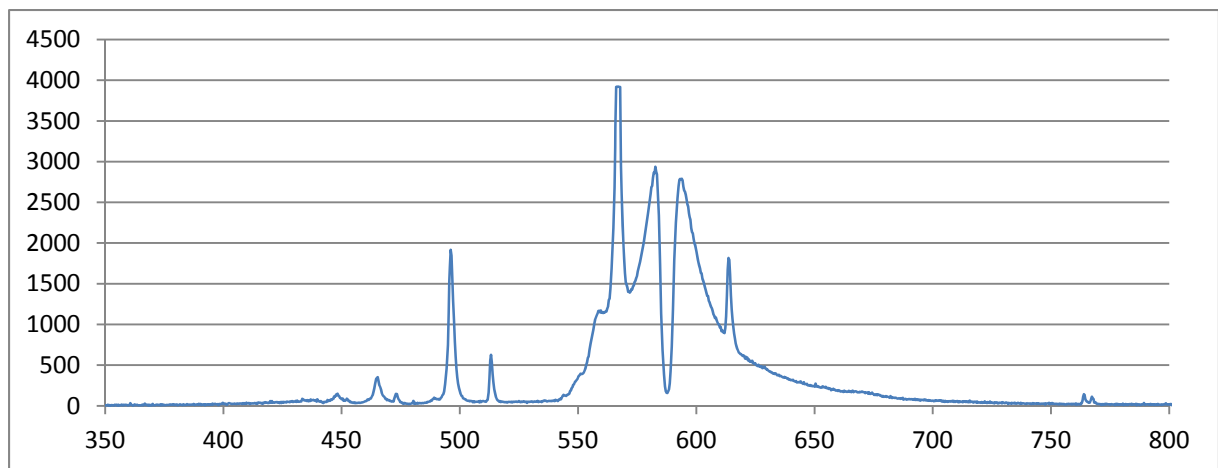
Korrigerat värde: $11740 \times 0,713 \approx 8371$ lumen

Då ljusflödet är relativt ointressant, om man inte vet hur mycket effekt lampan drar, mättes även effekten upp: 161, 161, 160, 161 och 162 watt

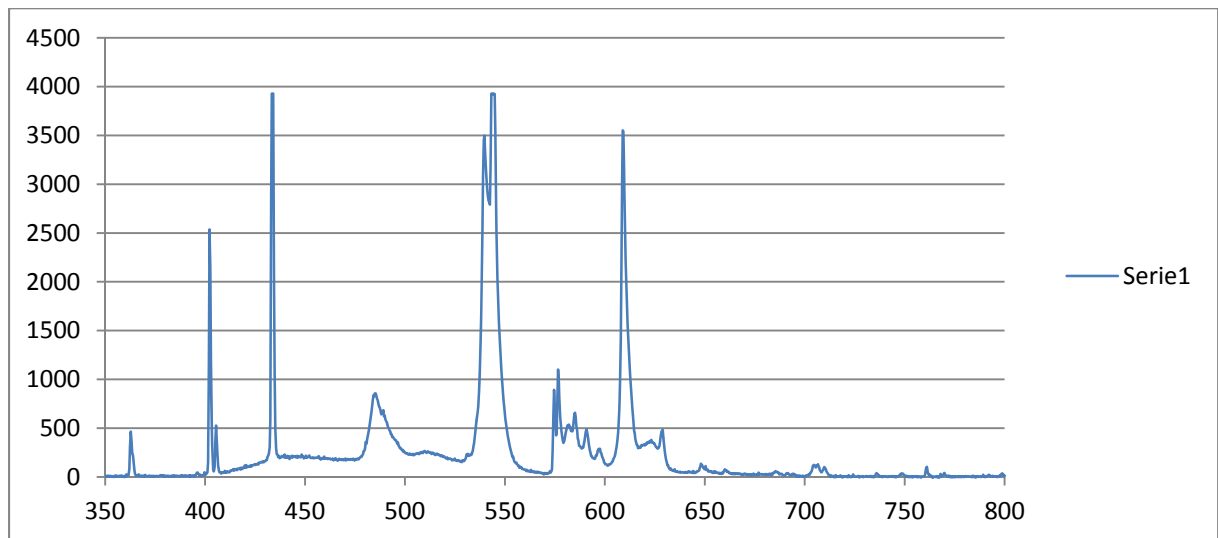
Medelvärde: $(161 + 161 + 160 + 161 + 162)/5 = 161 \text{ W}$

Ljusflöde/effekt: $8371/161 \approx 60 \text{ lumen/W}$

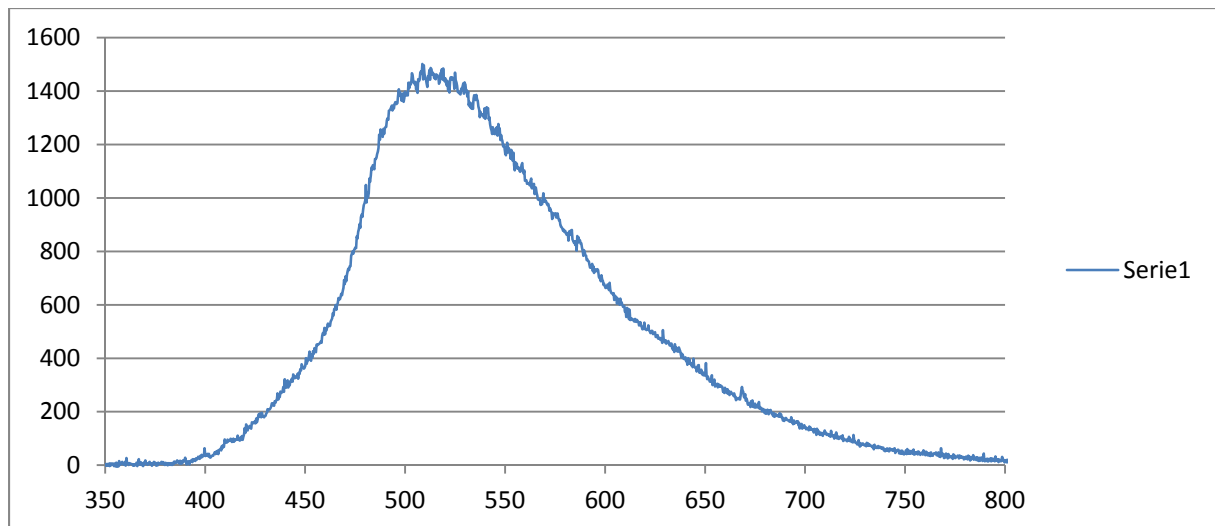
6.2 Spektralfördelning



Figur 11. HPS-lampans spektralfördelning, med intensitet som funktion av våglängd.



Figur 12. Induktionslampans spektralfördelning med intensitet som funktion av våglängd.



Figur 13. Plasmalampans spektralfördelning med intensitet som funktion av våglängd. Vi ser att plasmalampans spektralfördelning är betydligt jämnare (kontinuerlig) än de övriga. I avsnittet om fysiska processer som ger ljus gör jag ett försök att beskriva skillnaderna mellan ett kontinuerligt och ett icke-kontinuerligt spektrum. För- och nackdelar med fullspektrumljuskällor (dvs. ljuskällor med ett kontinuerligt spektrum) diskuteras i kapitlet om Ljusets betydelse för det mänskliga välbefinnandet.

7. Beräknade resultat och andra observationer

För att få en bild av ekoeffektiviteten (som behandlas i avsnitt 3.6.5) kan man, utöver att studera spektralfördelningarna i avsnitt 4.2 studera faktorer såsom upplevelsen av färgen på ljuset och om systemet låter eller bullrar vid drift.

Under mina mätningar noterade jag följande:

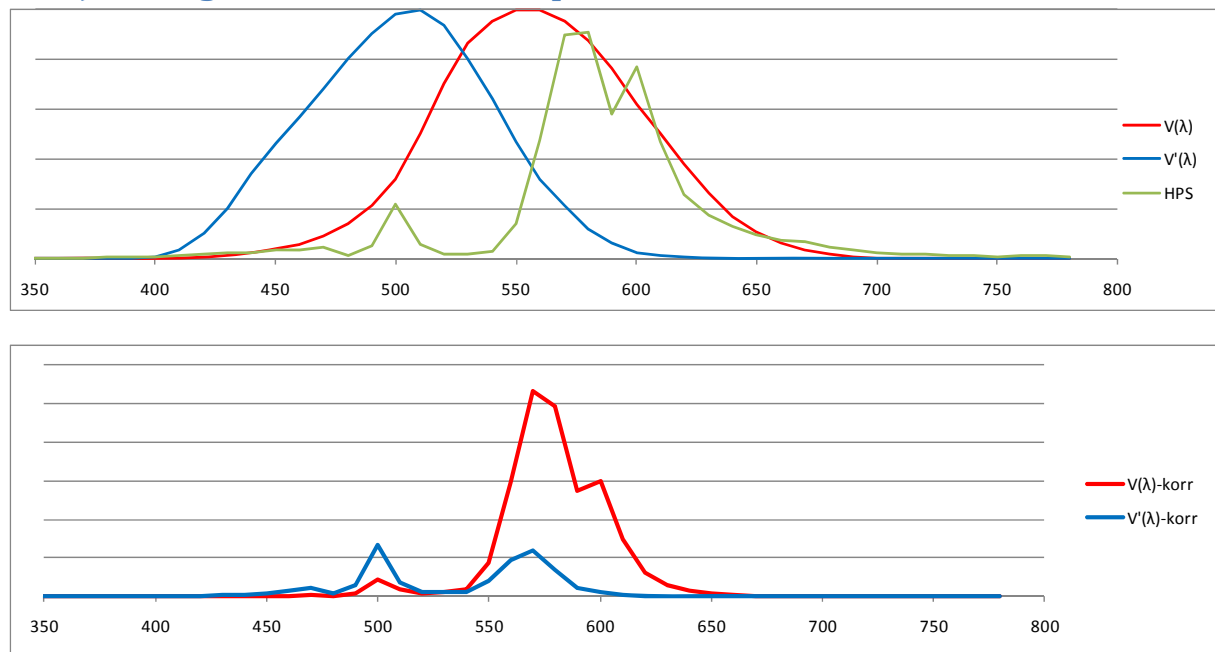
För HPS-lampan:

- Ljuset från lampan är relativt gult i jämförelse med övriga ljuskällor
- Lampan flimrar en aning och ger ifrån sig ett svagt sprakande ljud, särskilt vid uppstart.

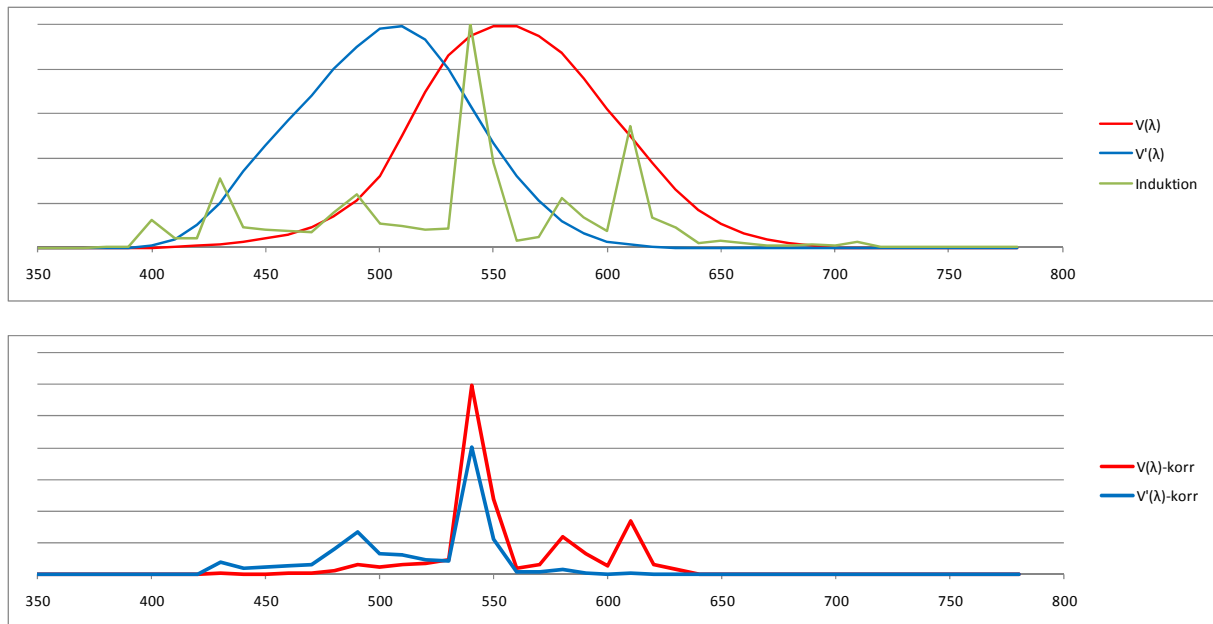
Plasmalampan:

- Prototypens kylfläkt surrar

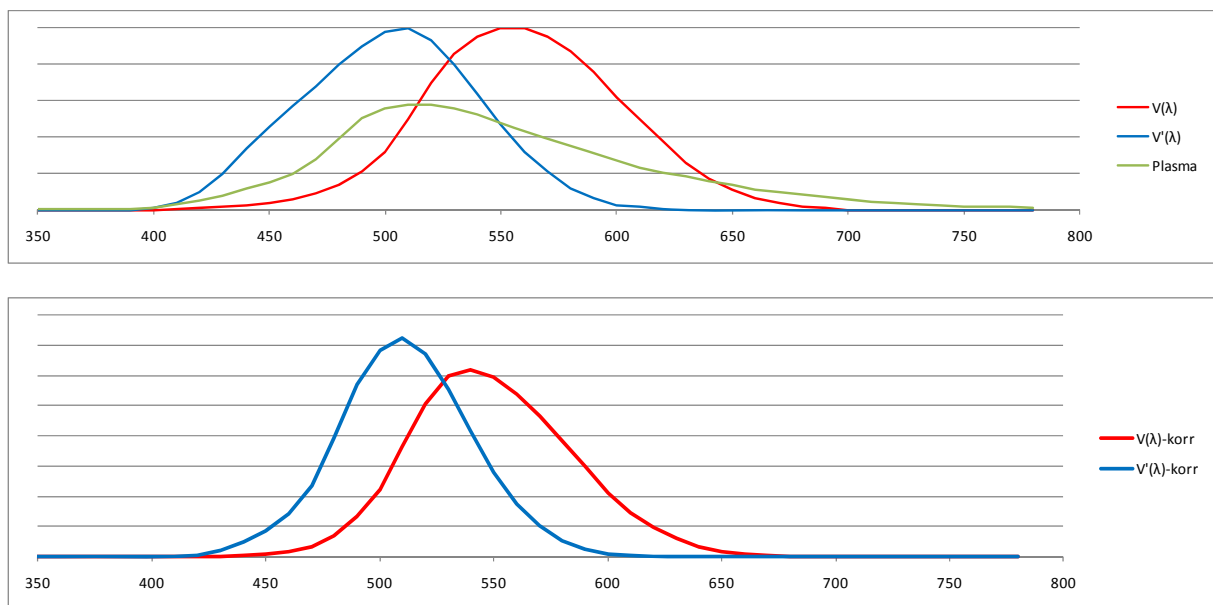
7.1 Ljusbild omräknat till skotopiskt seende



Figur 14. Visar hur spektralfördelningen för HPS-lampan förhåller sig till $V(\lambda)$ (den fotopiska funktionen) respektive $V'(\lambda)$ (den skotopiska funktionen). Vi ser i diagrammet att den största delen av fotonerna som HPS-lampan ger ligger inom våglängdsområdet för den fotopiska funktionen.



Figur 15. Visar hur spektralfördelningen för Induktionslampan förhåller sig till $V(\lambda)$ (den fotopiska funktionen) respektive $V'(\lambda)$ (den skotopiska funktionen). Vi ser i diagrammet att fotonerna som Induktionslampan ger är mer uppdelade på båda funktionerna. Den högsta toppen ligger dock inom det fotopiska området.



Figur 16. Visar hur spektralfördelningen för Plasmalampan förhåller sig till $V(\lambda)$ (den fotopiska funktionen) respektive $V'(\lambda)$ (den skotopiska funktionen). Vi ser i diagrammet att fotonerna som plasmalampan ger, liksom för induktionslampan, är mer uppdelade på båda funktionerna.

Spektralfördelningskurvorna visar hur stora andelar av ljusenergin som ligger vid olika våglängder. Genom att multiplicera spektralfördelningskurvorna med $V(\lambda)$ - och $V'(\lambda)$ -kurvorna fick jag kurvor som visar den relativa fördelningen av ljusupplevelse, mellan olika våglängder. Arean under dessa två kurvor visar den fotopiska respektive den skotopiska $\lambda\lambda$ ljusmängd-

supplevelsen. Kvoten mellan areorna under $V(\lambda)$ -korr och $V'(\lambda)$ -korr visar om den aktuella spektralfördelningen relativt sett ser ljusare ut på dagen eller på natten.

Förenklat sett kan man säga att HPS-lampans spektrum ser ljusare ut då man har mycket ljus (dagsljusseende) medan Plasmalampans spektrum relativt sett ser ljusare ut då man har lite ljus (skotopiskt seende). Detta beror på att mycket av HPS-lampans ljusenergi ligger vid de våglängder där $V(\lambda)$ -kurvorna har sin topp, medan en större andel av Plasmalampans ljusenergi ligger inom det våglängdsområde där $V'(\lambda)$ -kurvan har sin topp.

För att räkna om lumenvärdena (för fotopiskt seende) till ljusmängdsvärden med skotopisk viktning multiplicerade jag lumenvärdena med kvoterna mellan den skotopiska och den fotopiska arean enligt ovan, för respektive lampa.

HPS-lampan:

Fotopiskt: 100 %

Skotopiskt: 28 %

Induktionslampan:

Fotopiskt: 100 %

Skotopiskt: 75 %

Plasmalampan:

Fotopiskt: 100 %

Skotopiskt: 96 %

Eftersom ljusmätaren som användes vid mätningarna innehåller en inbyggd viktningsfunktion för $V(\lambda)$ -kurvan är de uppmätta värdena, för respektive lampa, i lumen/W viktade för den fotopiska funktionen. Om vi istället räknar om värdena med hjälp av det relativa värdet för $V'(\lambda)$ -funktionen erhåller vi följande värden. Jag använder lumen med ' för att visa kopplingen till $V'(\lambda)$ -funktionen.

HPS-lampan:

$122 \text{ lumen/W} \times 0,28 \approx 34 \text{ lumen}'/\text{W}$

Induktionslampan:

$60 \text{ lumen/W} \times 0,75 \approx 45 \text{ lumen}'/\text{W}$

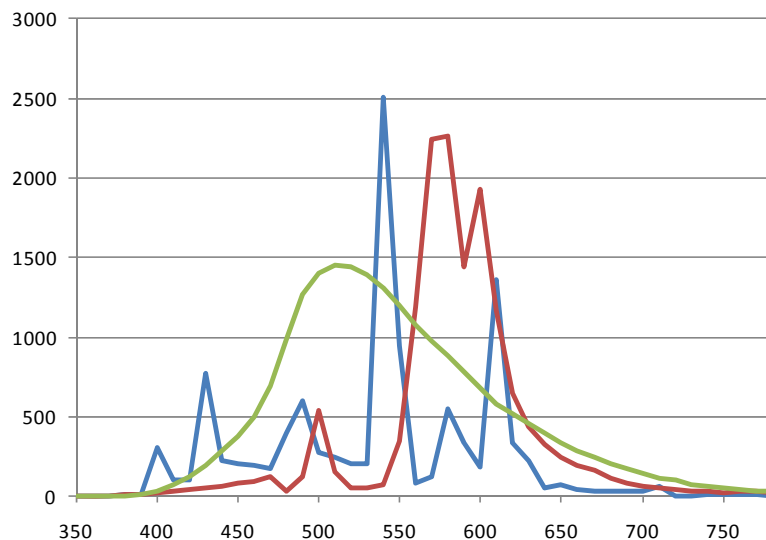
Plasmalampan:

$75 \text{ lumen/W} \times 0,96 \approx 72 \text{ lumen}'/\text{W}$

Vi ser att förhållandet mellan de olika lampor ändras radikalt då vi byter från $V(\lambda)$ -funktionen till $V'(\lambda)$ -funktionen.

Det är viktigt att förstå att de uträknade värdena i lumen'/W inte skall ses som ett entydigt mått på ljusmängden. Vilken funktion man bör använda är egentligen beroende av användningen av ljuskälla. För en mer objektiv, genomtänkt bedömning av de olika ljuskällorna rekommenderar jag att man bör studera relativa jämförelser av spektralfördelningar.

7.2 Jämförelse av spektralfördelningar, med samma skala för y-axeln



Figur 17. Visar relativ jämförelse av spektralfördelningar. De tre kurvorna har samma skala på ljuseffekt per våglängdsområde.

För att kunna göra en sann jämförelse av hur mycket energi ljuskällorna ger inom olika våglängdsområden har jag:

- Utgått från mina uppmätta spektralfördelningar. Jag visste dock inte den verkliga skalfaktorn för dessa kurvor.
- Viktat de mätta spektralfördelningarna med $V(\lambda)$ -kurvan för att få summavärden för arean under kurvan som kan jämföras med mina lumenmätningar
- Summerat de viktade spektralfördelningsvärdena och relaterat summan till mina mätningar av lumenvärden. Det bör här noteras att de mätta lumenvärdena skall ge en sann $V(\lambda)$ -viktad mätning av den totala ljusenergin från ljuskällorna.
- Korrigerat y-axelns skalfaktor för de uppmätta spektralfördelningarna så att skalan för alla de tre kurvorna visar lika många W/nm. Jag har inte räknat ut hur många W/nm utan bara korrigerat så att jag får samma skala för alla tre och därmed kan rita dem i ett diagram med samma skala på y-axeln.

7.3 Sammanfattande tabell inkluderande materialrelaterade miljöegenskaper

	Plasmalampa	Induktionslampa	HPS
Processkammare	Urladdningskammare av glas med Svavel	Glaskolv med Hg	Urladdningsrör av keramiskt material eller kisel med Na och Hg med högt tryck
Energitillförsel	Magnetron	Induktionsspole	Wolframelektroder
Matning	Mikrovågor 2,45 GHz	Radiovågor 13,6 MHz, 2,65 MHz och 250 kHz.	Växelspänning, t.ex. 10 kHz
Process	Excitation av Svavel som avger synliga fotoner. Emissionen bygger på excitation av molekyler och det höra trycket breddar linjerna till ett kontinuerligt spektrum.	Först excitation av Hg som ger fotoner med hög energi som i sin tur exciterar lyspulver som avger ljus med fler synliga våglängder.	Excitation av Na och Hg som ger ett spektrum av synliga fotoner. Linjerna breddas av det höga trycket.
Spektrum	Kontinuerlig bred topp	Huvudsakligen diskret	Delvis diskret
Färgtemperatur	6000 K	4500 K	2100 K
CRI* enl. försäljare/katalog	80-98 *	80	60-70
Lumen, enligt V(λ)	36359 lumen	8371 lumen	76293 lumen
W	1404 W	161 W	625 W
lm/W enligt V(λ) dagljusseende	75 lumen/W	60 lumen/W	122 lumen/W
lm/W enligt V'(λ) nattseende**	72 lumen'/W	45 lumen'/W	34 lumen'/W
Livslängd för lampa enl. försäljare/katalog	99000h (Utan ljusminskning)	60000h	28500h (det finns uppgifter om stor ljusminskning)
Livslängd för drivkretsar enl. försäljare	40 000h (Efter detta måste en del av drivkretsen bytas ut)	60 000 h	10 000 - 20 000 h
Buller	Prototypens kylfläkt bullrar		
Miljöaspekter	S och Ar är inte kända som miljöproblem.	Innehåller små mängder Hg.	Innehåller en liten mängd Hg.
Angående energiförbrukning se lm/W ovan och avsnitt 4.3	Drivkretsar med mycket material.	Drivkretsar med mycket material	Drivkretsar med relativt kort livslängd.
Hanterbarhet	Reaktionskammaren blir extremt varm, men buren gör att man inte kan ta på den.	Lampan blir mycket varm.	Lampan blir mycket varm.
Risker	Risk för elektromagnetisk interferens (stör andra apparater) Detta är enligt tillverkaren till största delen löst.	Risk för elektromagnetisk interferens (stör andra apparater)	

* Färgåtergivningskvaliteten är kopplad till färgtemperaturen, tabell 1. CRI för plasmalampen: 98 (60 lm/W) & 80 (140 lm/W), www.plasma-i.com

** lumenvärden omräknade till skotopiskt seende mha V'(λ)-kurvan.

Tabell 2. Sammanfattande jämförelse som inkluderar mätta och beräknade resultat, data från tillverkare och beskrivningar för plasma-, hps- och induktionslampa.

8. Diskussion

Vid analysen av en ljuskällas ekoeffektivitet är det lika väsentligt att fokusera på nyttosidan som på resurs- och energiförbrukningen. En viktig aspekt vid valet av ljuskälla är vilka våglängdsområden och hur mycket ljus av varje våglängd som en ljuskälla ger.

En lampa som inte ger bra ljus är inte bra även om den har liten miljöbelastning. Det är betydelsefullt om man kan välja en ljuskälla som ger rätt ljus av rätt våglängder och inte bara installera allt fler och allt starkare lampor. Rapportens analys fokuserar på ljusmängd i relation till energimängd. I det nedanstående diskuterar jag först mätningen av relevant ljusmängd och sedan miljöanalysen i sig.

8.1 Valet av ljuskänslighetsfunktion

Det är svårt att mäta mängden ljus och vid ett första påseende tycks det vara ännu svårare att mäta och beskriva ljusets kvalitet. När man tänker till måste man bestämma vilken egenskap det är man vill mäta innan man kan mäta mängden av denna egenskap. Man måste bestämma vad det är som kvalitativt karakteriserar den egenskap man vill mäta innan man kan mäta kvantiteten av denna egenskap. Det är komplicerat att bestämma ut vilken spektralfördelning och våglängd det är som gör att ljuset blir användbart och attraktivt för olika förhållanden.

Thorbjörn Laike och Reine Karlsson har berättat att det är många forskare som noterar att LED-lampor med större inslag av blått ljus ofta upplevs som mycket mer ljusstarka än andra lampor med lika stort lumenvärde, t.ex. på CIE-konferensen i Sun City Sydafrika, i juli 2011, <http://www.cie.co.at/index.php/LEFTMENU/About+us/CIE+Newsletter/Artikel+2+Dezember>. De här observationerna har resulterat i en dialog kring grunderna för hur man bör arbeta med mätning av ljusmängd.

Mätningen av mängden ljus görs normalt i lumen. Vid denna mätning används ett filter eller en omräkning som gör att det gula ljuset får högst viktning medan det blåa och det röda ljuset ges väsentligt lägre vikt, se figur 14-16. Man kan tänka sig att ”ingångsfilter” till lumenmätaren släpper igenom allt gult ljus vid 555 nm medan bara en bråkdel av det blåa och det röda ljuset släpps fram till den effektmätande sensorn. Denna form av mätning avser att beskriva den relativa mänskliga upplevelsen för olika våglängder av dagsljus, d.v.s. hur människor upplever olika våglängders ljushet i ett relativt upplyst rum, för fotopiskt seende. Den här formen av våglängdsviktning för mätning av lumen är helt dominerande i den allmänt förekommande mätningen av ljusmängder.

Alternativt kan man göra en mätare som bygger på hur människor upplever olika våglängders ljushet i ett relativt mycket mörkt rum, för skotopiskt seende, nattljusseende. $V'(\lambda)$ -kurvan är en specifikation för ett ”ingångsfilter” som ger den formen av viktning av olika våglängder. Den kurvan ger högst viktning av ljus med 508 nm. I avsnitt 5.1 har jag använt de spektralfördelningar som jag mätt upp och $V(\lambda)$ och $V'(\lambda)$ -kurvorna till att räkna om de lumenvärdena från ljusmätaren till vad jag skulle ha fått om min ljusmätare hade haft ett ”ingångsfilter” med den skotopiska känslighetskurvan. Som framgått i tabell blir det mycket stor skillnad på de resulterande värdena.

Om man fokuserar på att det blåa ljuset tenderar att ge speciellt bra förutsättningar för att se skulle det kunna motivera en ännu högre betoning av det kortvågiga (energirika) ljusets betydelse. Om man gjorde så skulle ljuset från plasmalampan relativt se ut att ge en mycket stark ljusupplevelse. En sådan våglängdsviktning skulle kunna resultera i att ljusmängdsvärdena för plasmalampan blev mångdubbelt högre än ljusmängderna för de lampor jag jämför den med.

Jag finner inget konkret tydlig modell för hur man skulle kunna, eller kanske borde, göra en sådan omräkning av de uppmätta ljusmängderna. Styrkan i intresset för det blåa ljusets resulterande intensitetsupplevelse gör dock att jag väljer att framhålla värdena som jag beräknade för $V'(\lambda)$ i slutsatsen och i sammanfattningen.

Vid mätning av upplevd ljusintensitet betonas de två ljuskänslighetskurvorna, $V(\lambda)$ och $V'(\lambda)$ (CIE, 2005). Under senare år och t.ex. på Ljuskursen på LRC talade man mycket om mesopiskt skymningsseende. CIE:s (Internationella belysningskommissionen) metod att hantera denna fråga är att göra en mesopisk viktningskurva som i princip är ett viktat medelvärde av den fotopiska och den skotopiska kurvan. Det verkar som om man betraktar $V(\lambda)$ och $V'(\lambda)$ -kurvorna som fasta teoretiska referenspunkter, som man inte tänker sig att ändra på i någon nämnvärd grad.

Om man tänker mer fritt och tar fasta på att det blåa ljuset ger ett intryck att vara intensivt och att man i många situationer tycks se mycket bra i blått ljus är det rimligt att göra en friare tolkning. Det tycks rimligt att vissa våglängder och våglängdsområden ger bra seende, speciellt i en del situationer och kanske i synnerhet i vissa delar av synfältet.

Vid höga belysningsnivåer hamnar en stor mängd ljus på näthinnan, vilket i sin tur styr pupillen till att minska i storlek. Då pupillen blir mindre hamnar en mindre mängd ljus på näthinnans ytterkanter, vilket gör att vi ser sämre i perifera områden. Ett sätt att förbättra möjligheten att upptäcka saker i synfältets periferi är att lysa upp de områden som vi ofta ser i synfältets periferi, t.ex. väggrenar. Ett annat sätt är att välja belysning som ger ljus med våglängder som gör att vi ser bättre vid låga belysningsnivåer, dvs. mer energirikt (blått) ljus.

Ett tydligt exempel på när detta får betydelse är i trafiken. Vi har blivit vana vid att tänka på vikten av att belysa vägbanan, dvs. i det område där vi använder oss av direktseendet. Illuminansen på vägbanan är ofta hög och vi glömmer lätt att det är lika viktigt att kunna se eventuella faror som lurar i periferin, exempelvis barn som kommer utspringande eller vilda djur.

Eftersom ljuset från HPS-lampan nästan bara innehåller gult ljus och således fungerar relativt dåligt vid låga belysningsnivåer tycks det med ett sådant ljusspektrum vara svårare för oss att upptäcka vad som finns i synfältets periferi. I alla de situationer då det är viktigt att kunna upptäcka saker, även då ljusnivån är låg och i synfältets periferi är det därför tveksamt att använda denna form av ljuskälla. HPS-lampor används fortfarande på bangårdar och parkeringsplatser och det kan vara en risk. För att öka möjligheten till ett bra seende även i kritiska situationer ser det ut att finnas fördelar med att ha med en andel blått ljus. Min beräkning av ekoeffektivitet använder därför de ljusmängdsvärden som jag beräknat med $V'(\lambda)$ -kurvan som nyttomått, funktionell enhet.

8.1.1 Relativ jämförelse av spektralfördelningar

Den stora skillnaden mellan relationerna för lumenvärdena respektive för de korrigerade lumenvärdena visar att det är viktigt att veta hur man bör göra viktningen för olika våglängder. Den resulterande kurvan i figur 17 visar hur mycket energi ljuskällorna ger inom olika våglängdsområden, med samma skala på y-axeln för alla de tre kurvorna. Denna form av jämförelse är mycket mer informationsrik än att göra en jämförelse som bara baseras på en form av viktning eller för en vald del av spektrum.

Om man vet vilka våglängder av ljus man vill ha för en viss tillämpning vore det logiskt att mäta mängden ljusenergi för de aktuella våglängdsområdena. I de flesta fall vet man dock inte vilka våglängder man vill ha. Det är därför osannolikt att lumenvärdena eller de korrigerade lumenvärdena eller något annat enskilda värde skulle ge en rättvisande bild för den tillämpning som man råkar arbeta med i det aktuella fallet. De normaliserade kurvorna ger en möjlighet till mycket mer genomtänka jämförelser av de olika ljuskällorna.

Det vore önskvärt att utveckla en mätmetodik som kombinerar Ulbrichtklot för rumslig integration med användning av spektrofotometrar som är kalibrerade på ett sådant sätt att de visar verklig energimängd per våglängdsområde.

8.1.1 Plasmalampan kontinuerliga spektrum

Plasmalampan beskrivs som en fullspektrumljuskälla och som framgår i teoriavsnittet finns det sedan 1960-talet forskare som ser stora fördelar med fullspektrumljuskällor. Fullspektrum är ingen universallösning, men det ser ut att ha principiella fördelar jämfört med diskreta, ojämnt fördelade spektralfördelningar. Korta våglängder tycks ha avgörande fördelar när det gäller möjlighet att upptäcka saker vid liten ljusstyrka. De är också verkningsfulla för att påverka de cirkadiska cyklerna så att man ställer in kroppens dygnsrytm. Det bör dock också noteras att det finns en diskussion kring risker med intensivt blått ljus, blue light hazard (Wikipedia, 2011).

Som motsats till fullspektrum kan nämnas att Hps-lampan har ett begränsat spektrum med gyllengul färg på ljuset. Jämfört med andra tillgängliga ljuskällor är färgåtergivningskapaciteten för Hps-lampor låg. Inomhus används lampan därför endast där färgåtergivningen inte är viktig. Hps-lampan kan genomgå färgskiftningar under sin livstid. På grund av skillnader i natriumförlust och strömpåslag kan vissa lampor se gröna ut, djupt gula eller till och med rosa när slutet för dem närmar sig. Denna form av färgegenskaper är knappast önskvärd.

8.2 Miljöaspekter

8.2.1 Energirelaterad miljöbelastning

Som nämnts i teorin fokuserar miljöintresset för ljuskällor på energiförbrukningen under produktens användning. De flesta anser att den helt dominerande miljöbelastningen för ljuskällor orsakas av produktionen av den el som används för att driva lampan.

Ljuskällornas effektivitet beror dels på den ljusalstrande processen och dels på ett antal olika former av förluster. Det finns ett antal skillnader mellan olika ljusalstrande processer, men en skiljelinje är om alstringen av det synliga ljuset är direkt eller indirekt. Tabell 3 ger en översikt över ljuskällor med direkt respektive indirekt ljusalstringsprocess. En indirekt process innebär att ljuset måste göras om till andra våglängder för att få synligt ljus. Processen innebär ett extra steg där man förlorar energi.

Utöver själva ljuskällans effektivitet bör det också noteras att det finns ett antal olika former av förluster i drivkretsarna. Jag har mätt den totala elförbrukningen för ljuskälla plus drivkrets.

Tabell 3. Översikt av vilka ljuskällor som har direkta och indirekta processer för alstring av synligt ljus.

	Direkt process	Indirekt process
Glödlampa	Svartkroppsstrålning	
Lysrör och lysrörslampor		Lysrörets Hg ger en del energirika fotoner som transformeras med ett Lyspulver.
HID	Plasmalampans svavelplasma ger ett kontinuerligt spektrum. HPS-lampans plasma med Na ger spektrumtoppar i gult.	Induktionslampas Hg ger fotoner som delvis transformeras med ett Lyspulver.
LED-lampor	RGB – vita LED	LED-lampor med blåa dioder har lyspulver som transformerar till längre våglängder.

Jag har mätt ljuskällornas elförbrukningar och gjort en sammanställning av de andra formerna av miljöbelastningar. Jag har inte räknat om elanvändningen till koldioxidutsläpp för fossileldning och andra miljörisiker. En anledning till detta val är att Sveriges elproduktion domineras av vattenkraft och kärnkraft. I koldioxidtermer ser det ut som om dessa former av elproduktion knappast orsakar några miljöproblem och risker. Jag anser att en sådan bild tenderar att bli missledande och fokuserar istället på att el är en värdefull resurs. Således anger jag elförbrukning som ett mått på användningsfasens huvudsakliga miljöbelastning.

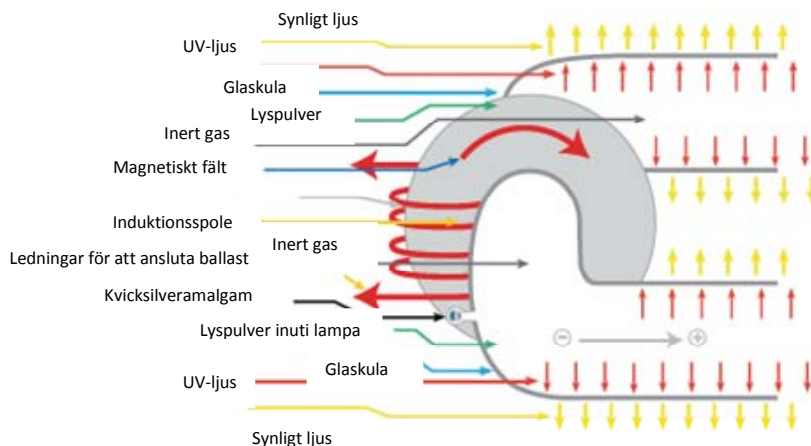
8.2.2 Materialrelaterade miljörisiker

Det kvicksilver som finns i en del lampor anses också vara en allvarlig miljörisk. För en fullständig analys av en ljuskällas miljöbelastning är det också viktigt att studera alla de miljö- och resursmässigt intressanta material som ljuskällan innehåller.

Jag har inventerat vilka ljuskällor som innehåller Hg. Jag har inte funnit några bra uppgifter på hur mycket Hg de olika ljuskällorna innehåller. Som jag uppfattar det innehåller en ljuskälla med högre effekt generellt sett mer Hg, men å andra sidan kan den ha något mindre Hg per ljusmängd. Liksom i andra fall är det troligen också så att produkter som är konstruerade och tillverkade på ett mer högkvalitativt sätt klarar sig med mindre Hg för att uppnå den erforderade funktionen.

Induktionslampan, liksom HPS-lampan, innehåller små mängder kvicksilver. En del tillverkare av HPS-lampor hävdar att deras lampor saknar kvicksilverinnehåll, men då innehåller de istället amalgam som i sin tur innehåller kvicksilver (RPI, 2011). Avfallsförbränning av ljuskällor är en källa till kvicksilverutsläpp som, oavsett form, är farligt eftersom allt kvicksilver vi släpper ut potentiellt kan omvandlas till metylkviksilver. Kviksilverret är inget miljöproblem medan lamporna används om de inte går sönder. Kviksilverret i de uttjänta lamporna är heller inget avsevärt problem om de samlas in och återvinns på ett bra sätt.

Urladdningsröret i HPS-lampan innehåller xenon och en natrium-kviksilver amalgam blandning. Elektroden består av volfram. En del HPS-lampor har lyspulver för att sprida ut ljuset (Pacific Energy Center, 1997).



Figur 17. Visar Uppbyggnaden hos en induktionslampan. Vi ser i beskrivningen av lampan innehåller lyspulver.

Ljusutbytet minskar med tiden, till följd av en degradering av den ljusemitterande fosfor som täcker glaskulan. Induktionslamporna innehåller också små mängder kvicksilver.

Lyspulver måste ha speciella egenskaper för att kunna transformera fotoner mellan olika våglängder. Det är små mängder lyspulver, men en del av de ingående grundämnena och kemiska föreningarna är väldigt ovanliga. Det finns därför risk för att de är miljömässigt problematiska. Att grundämnena är så ovanliga gör också att det kräver en extremt stor gruvverksamhet och anrikningsprocesser, räknat per mängd material såvida de inte utgör biprodukter till annan utvinning. Den senaste tiden har pressen också observerat att det nästan bara är Kina som utviner en del av de här materialen.

Drivkretsarna hos plasma- och induktionslampan innehåller relativt mycket material och drivkretsarna hos HPS-lampan har relativt kort livslängd. Drivkretsarnas kortare livslängd är väsentligt med tanke på den resulterande utbytestakten. Lådorna med drivkretsarna är tunga, speciellt för plasmalampan. Huvuddelen av materialet är troligen metaller som är relativt oproblematiska miljömässigt sett, även om det naturligtvis orsakar resursförbrukning och miljöbelastning att framställa metallerna. Lådorna innehåller också en del plast, mest som isole-

ring på de elektriska ledningarna, och den plasten innehåller flamskyddsmedel. Drivkretsarnas elektronik innehåller också en del miljömässigt speciella ämnen.

Det är önskvärt med en grundlig inventering av innehållet i lamporna. Genom att sprida informationen kan man stimulera tillverkare till att minska materialmängden och även öka chanserna till en tillfredställande återvinning. Det finns många detaljer som egentligen borde undersökas i en djupare miljöanalys.

Slutsats

För att kunna bedöma en ljuskällas ekoeffektivitet är det grundläggande att klargöra hur mycket och vilken form av ljus man behöver. Plasmalampan spektrum ger möjlighet att kunna se vid låg belysningseffekt och det är en viktig miljöfråga.

Det är påtagligt att olika former av ljusmängdsvärden ger helt olika bilder av olika ljuskällor. För att höja förmågan att välja rätt ljuskällor borde man använda kalibrerade spektralfördelningskurvor och inte bara lumenvärden.

Tack!

Det är lite ovanligt med ett kandidatarbete i miljövetenskap med inriktning på fysik och jag vill tacka alla er som hjälpte mig att möjliggöra projektet. Jag vill framföra ett stort tack till alla er som bidragit med synpunkter och idéer.

Jag vill främst tacka Johan Andersson för projektförslag, ditt stora engagemang och att du lånade ut de lampor som gjorde mätningarna möjliga. Jag vill också tacka Thomas Lennartsson för all hjälp vid utförandet av mätningarna och för många bra synpunkter och idéer.

Jag vill också rikta ett särskilt tack till Anne Andersson för att du ställde upp och visade ljusmätningmöjligheterna på SP och till Energimyndigheten för att jag fick möjlighet att delta i kursen vid Light Research Center vid Rensselaer Polytechnic Institute, NY.

Referenser

- Avell'en S., Nilsson S., Svensson K., *Bergvalls fysik för gymnasiet*, 1967, Bergvalls förlag
- Figueiro M. *Research recap*, Lighting Research Center
- Figueiro M., L Gras, R Qi, P Rizzo, M Rea, MS Rea, *A novel night lighting system for postural control and stability in seniors*, Lighting Research Center, 2007
- Flesch, Peter. "Light and Light Sources", 2006, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- ISO 14 040, *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*, CEN Brussels, 1997
- Hippler R., Kersten H., Schmidt K., Schoenbach H. "Low Temperature Plasmas: Fundamentals, Technologies and Techniques", 2008 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co kGAA Weinheim
- Howard, Brian Clark; Bringsky, William J and Seth Leitman. "Green Lighting: How Energy Efficient Lighting Can Save You Energy and Money and Reduce Your Carbopn Footprint", 2011, The Mc Graw Hill Companies
- Karlsson m.fl. *Begreppsbildning och ämnesområden för Flervetenskaplig ljusforskning; akademisk forskning för näringslivsutveckling för funktionell energieffektiv belysning som befrämjar hälsa och välbefinnande*, 2011
- Kitsinelis, Spiros. "Light Sources: Technologies and applications", 2011; USA, Taylor and Francis
- Leistevuo J., Leistevuo T., Helenius, *Dental Amalgam Fillings and the Amount of Organic Mercury in Human Saliva*, Journal: Caries Research, 2001
- Li, Danny H.W. *A review of daylight illuminance determinations and energy implications*, 2010, City University of Hong Kong
- Lighting Research Centre, *A proposed 24 h lighting scheme for older adults*, 2008, Rensselaer Polytechnic Institute Troy, NY
- Miller D., A Bierman, MS Figueiro, ES Schernhammer, MS Rea, *Ecological measurements of light exposure, activity and circadian disruption*, Lighting Research Centre, 2010
- NLPIP Lighting answers, *Full spectrum light sources*, 2005
- Piel, Alexander. "Plasma Physics: an Introduction to Laboratory, Space and Fusion Plasmas", 2010, Springer Heidelberg
- Ralph L. Barnet and Gary S. Waldman. "The incandescent lamp: a module on thermodynamics, current electricity, and photometry", 1975, Mc Graw Hill
- Rea, Mark S, *Lighting Handbook; Reference and application*, 1993, Copyright by Illuminating Engineering Society
- Rolf S. Bergman and Yoshi Ohno, *The Art and Science of Lamp Photometry*, 2001,
- RPI, Swedish Energi Agency Lighting seminar, 13-17 juni, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, 2011
- Weizsäcker Ernst von, Amory B. Lovins and L Hunter Lovins, *Factor four: Doubling wealth, halving resource use*, The new report to the Club of Rome, Earthscan Publications Ltd., London, 1997

Elektroniska källor

Ceebel, <http://ceebe.se/?s=ljuspriset>, 2010

CIE-konferens 2011,

<http://www.cie.co.at/index.php/LEFTMENU/About+us/CIE+Newsletter/Artikel+2+Dezember>

CIE, Photometry - The CIE System of Physical Photometry

http://www.cie.co.at/index.php/index.php?i_ca_id=475, 2005

Fulham High Horse, *Induction Lighting Systems*, www.flynn-reynolds.com/pdfs/HighHorseInduction.pdf

Halonen L., Puolakka M., Sydafrika, *CIE and mesopic photometry*

<http://www.cie.co.at/index.php/LEFTMENU/About+us/CIE+Newsletter/Artikel+1+Oktober>, 2011

Belysningsbranschen, *En ljusare framtid Att spara energi och miljö med modern belysning*

www.ljuskultur.se/files/Litteratur.../En_ljusare_framtid_utg_2.pdf, 2011-07-14

Lighting Res. Technol., *Measurement and specification of lighting: A look at the future*, 2009

Web-baserat utbildningsmaterial; *Lighting Education Online*, www.lrc.rpi.edu/education/learning, LRC, 2011-07-02

Ljuskultur . LED, <http://www.ljuskultur.se/fakta-och-miljo/teknik/led/>, 2011

Ott J., Risk Factor Artificial Light – Stress due to incorrect illumination <http://www.viva-lite.se/vad-aer-fullspektrumbelysning.html>,

Wikipedia, *Sulfur lamp*, http://en.wikipedia.org/wiki/Sulfur_lamp, 2011-07-14

Ocean Optics Inc. USB 2000 Operating instructions,

www.oceanoptics.com/technical/USB2000%20Operating%20Instructions.pdf, 2011-07-01

Pacific Energy Center, *High Pressure Sodium Lamps – A Pacific Energy Center Factsheet*,

www.lightingassociates.org/i/u/.../f/.../High_Pressure_Sodium_Lamps.pdf, 1997

Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/High-energy_visible_light, 2011

Kurser och studiebesök

IIIEE (International Institute for Industrial Environmental Economics), *Industriell miljöekonomi för miljövetare*, 2011

Deltagande vid *Lighting Seminar 13-17 juni 2011*, Swedish Energy Agency vid Light Research Center vid Rensselaer Polytechnic Institute (RPI), NY.

Studiebesök hos Anne Andersson vid Sveriges Tekniska Forskningsinstitut i Borås