



CHALMERS



Energiöverföring via ljus

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Mekatronik

Vedran Muskic

Förord

Examensarbetet omfattar 15 högskolepoäng (HP) och är den avslutande delen av Mekatronikprogrammet om totalt 180 HP på Chalmers tekniska högskola. Examensarbetet har utförts på institutionen för elektroteknik med Erik Agrell som examinator och Johan Östman som rådgivare. Arbetet har genomförts för teknikkonsultbolaget Broccoli Engineering AB i Göteborg.

Jag vill rikta ett stort tack till företagets grundare Björn Bergholm som har sponsrat och hjälpt till med utformningen av examensarbetet. Jag vill också tacka konsultchefen Petra Panzar som har givit mig goda råd och hjälpt till med den praktiska delen under arbetet. Tack Johan Östman för alla råd och feedback under examensarbetets gång och utformningen av rapporten och tack till Erik Agrell som har varit examinator för detta examensarbetet.

Sammanfattning

Denna rapport är ett resultat av examensarbetet som har utförts på Broccoli Engineering. Syftet var att konstruera en trådlös energiöverföring via ljus och utforska olika användningsområden för den mottagna energin. Tester genomfördes för att undersöka om olika våglängder och ljusintensitet påverkar verkningsgraden vid överföringen. Tester gjordes även på hur energin vid mottagaren varierade vid olika avstånd.

Materialet som användes var följande: lysdioder, samlingslins, fokuseringslins och solceller. Sändaren bestod av en uppsättning LED (Light emitting diode) där sex sändare med olika våglängder valdes att studeras. Mottagaren bestod av solceller som tog emot ljuset och omvandlade det till energi i form av spänning och ström. Därtill användes en fokuseringslins, samlingslins och reflektorer för att minska spridningsvinkeln från sändaren och koncentrera ljuset till mottagaren.

I resultatet framkom det att samlingslinsen minskade spridningsvinkeln från ljuskällan, men ej ökade verkningsgraden jämfört med resultatet av verkningsgraden utan användning av samlingslinsen. Även användning av fokuseringslinsen ökade ej resultatet på verkningsgraden. Vid ett avstånd på 0–20 cm mellan sändare och mottagare kunde en lysdiod tändas. Vid ca 5 cm avstånd kunde ett mobilbatteri laddas, dock laddades batteriet långsamt på grund av den låga strömmen från solcellen. Det framkom att verkningsgraden som erhöles vid energiöverföringen var låg, verkningsgraden var som högst ca 1,45%.

Nyckelord: Lysdiod, optik, solcell, reflektor, USB, UV

Abstract

This report is a result of a thesis work that was performed at Broccoli Engineering. The purpose was to create a wireless energy transmission through light and investigate areas of use for the energy. Some tests were performed to see if different wavelengths and light intensity can affect the efficiency of transmission. The result from the tests showed how the energy of receiver technology varies at different distances.

The following materials were used; LEDs (Light emitting diode), collector lens, focus lens and solar cells. The transmitter consists a set of LEDs where six transmitters with different wavelength were chosen to be studied. The receiver technology consists of a certain number of solar cells which are responsible for receiving the light and transforming it into electricity. With focusing lens, collector lens and reflectors were used to reduce the viewing angle from the transmitter and concentrate the light to the receiver.

It was found from the result that the lens array reduced the viewing angle from the light source, but it didn't increase the efficiency compared to the efficiency measured without lens array. Even with the focus lens the efficiency of the receiving energy of light did not increase the efficiency. At 0-20 cm between transmitter and receiver, a LED could be lit. At about 5 cm distance, a mobile battery could be charged, but the battery was slowly charged due to the low current from the solar cell. It was found that the efficiency achieved at the energy transfer was low, the efficiency was at most about 1.45%.

Keyword: LED, optics, solar cell, reflector, USB, UV

Innehåll

Inledning	1
1.1 Bakgrund.....	1
1.2 Syfte.....	1
1.3 Avgränsningar	1
1.4 Precisering av frågeställning.....	1
2 Teknisk bakgrund.....	3
2.1 Lysdiod.....	3
2.2 Solcell.....	5
2.3 Optik	6
2.3.1 Fokuseringslins	6
2.3.2 Samlingslins	7
2.4 Reflektor	8
3 Metod	9
4 Konstruktion.....	10
4.1 Val av sändarteknologi	10
4.2 Val av mottagarteknologi	12
4.3 Val av optik	13
4.4 Val av reflektor.....	14
4.5 Testplattform	15
5 Resultat	16
5.1 Test av spridningsvinkel	16
5.1.1 Minska spridningsvinkel med samlingslinsen	16
5.1.2 Minska spridningsvinkel med reflektor	16
5.1.3 Fokusering av ljus med fokuseringslins	17
5.2 Test av solcell.....	17
5.2.1 Distanstestning.....	17
6 Diskussion	20
7 Slutsats.....	21
Källförteckning	22

Inledning

1.1 Bakgrund

Broccoli är ett teknikkonsultbolag som är specialiserat på elektronikutveckling. I företaget utgörs konsulterna av ingenjörer som arbetar inom elektronik, data och mekatronik samt teknisk fysik [1]. I personlig kommunikation med Broccolis grundare Björn Bergholm framgick det att LED-lampornas intåg i vår vardag blivit en revolution. LED används idag i många tekniska apparater men också i belysning, exempelvis spotlights. Därav har vi numer möjlighet att välja bl.a. ljusflöde (lumen) och färgtemperatur (grader Kelvin) vid köp av en ljuskälla. Det, till skillnad från förr då vi nästan enbart beaktade effekten (Watt). Det som därefter har framkommit är området energiöverföring via ljus. När en trådlös energiöverföring på långa avstånd med bibehållen säkerhet och hög verkningsgrad har skapats kan den nya tekniken för energiöverföring vara ett alternativ för olika områden. Därför menar Björn Bergholm att det ligger i företagets intresse att undersöka trådlös energiöverföring med hjälp av ljus. Detta lade grunden till syftet och frågeställningarna.

1.2 Syfte

Syftet var att undersöka om det går att samla ljus från en ljuskälla och rikta det mot en mottagarteknologi, som i sin tur kan omvandla det till elektricitet för att kunna tända en lampa eller ladda ett batteri. Ljuset som överförs ska ske på ett säkert sätt utan någon fara för omgivningen.

1.3 Avgränsningar

I arbetet studeras ljus enbart från elektrisk ljuskälla (UV-lampa, lysdiod, strålkastare).

1.4 Precisering av frågeställning

- Verkningsgraden är ett bra mått på hur mycket av den energin som mottagits från ljuskällan som reflekteras bort eller förloras i form av värme jämfört med den energin som skickades. Därför är det intressant att undersöka hur hög verkningsgrad som kan uppnås.
- För att en mottagare skall kunna ta emot sändarens energi är det lämpligt att spridningsvinkeln är noll. Därav är det intressant att undersöka frågan om det går att uppnå noll graders spridningsvinkel.
- Effektens storlek är av betydelse för olika användningsområden, till exempel lampor och batterier. Kan effekten som erhålls användas?

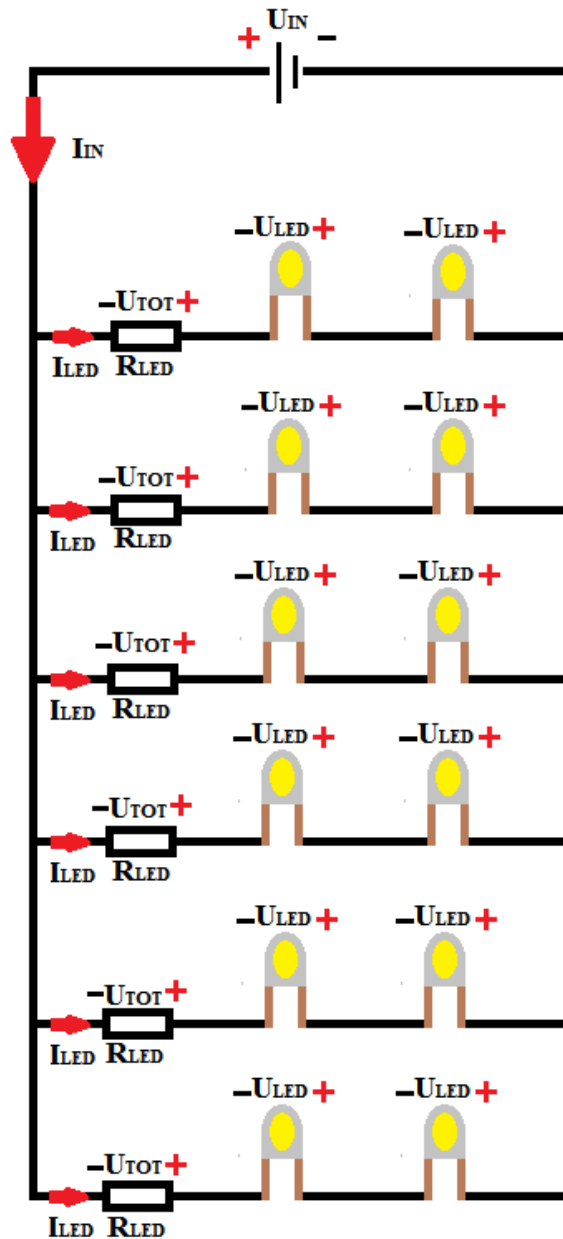
- Det finns ljus som kan vara skadligt för det mänskliga ögat. Därför är det av intresse att undersöka om det finns svensk lagstiftning som innebär begränsningar i användandet av olika typer av våglängder av ljus och om synligt eller osynligt ljus kan skada ögat vid energiöverföringen.
- Energiöverföring via ljus förutsätter att val av sändare och mottagare. Det innebär att det är av intresse att undersöka vilka sändare och mottagare som är mest lämpade att använda vid undersökning av energiöverföring via ljus.
- Vilka våglängder är lämpliga för att åstadkomma en effektiv energiövergång?

2 Teknisk bakgrund

2.1 Lysdiod

En lysdiod är en halvledare vilket innebär att den består av halvledande material. Lysdioden har liknande funktion som en vanlig diod, med skillnad att lysdioden genererar ljus då en ström passerar. Halvledarmaterial bestämmer ljusets färg och våglängd tillsammans med mängden energi som går genom halvledarmaterialet. Lysdioder kan få fram olika våglängder inom spektrumet som ultraviolett, synligt ljus och infraröd [2].

Halvledarmaterialet hos lysdioden är impregnerat eller dopat med föroreningar för att den ska bilda en så kallad PN-övergång. Fotoner skapas när en elektron passerar en barriär tills dess att den kommer till ett elektronhål som sänker dess energinivå. Det leder till att energi frigörs i form av fotoner. Likt en vanlig diod förs strömmen enbart från den p-dopade sidan till den n-dopade sidan och inte vice-versa. Lysdioden avger ljus när ström passerar lysdioden, enligt principen av elektroluminiscens. Elektroluminescens är ljusutsläpp som sker när elektroner drivs av ett elektriskt eller magnetiskt fält till ett lägre energiomlopp och släpper ut överskottsenergin i form av elektromagnetiska strålningar [3].



Figur 2–1 visar hur ljuskällan kan kopplas.

Det finns olika sätt att koppla en lysdiod, ett exempel kan ses i figur 2–1. För att ta reda på vilken resistans R_{LED} som krävs för varje koppling av ljuskälla användes Ohms lag. Resistansen finns med för att få rätt spänning U_{LED} och ström I_{LED} över lysdioden för att den ska avge ljus

$$R_{LED} = \frac{U_{TOT}}{I_{LED}} \quad (2.1)$$

Där

$$U_{TOT} = U_{in} - A_U \times U_{LED} \quad (2.2)$$

och A_U är antalet lysdioder i ett led. Effekt fås genom

$$P_{in} = U_{in} \times I_{in} \quad (2.3)$$

där P_{in} är den effekt som används till ljuskällan för att den ska sända ljuset och I_{in} är den totala strömmen i kretsen för ljuskällan. Alltså är

$$I_{in} = A_I \times I_{LED} \quad (2.4)$$

2.2 Solcell

En fotovoltaisk cell eller solcell är en uppsättning av halvledare som har liknande funktioner som en fotodiod. Solcellen består huvuddels av två skikt som är av olika halvledarmaterial. Dessa två material ska omvandla solens ljusenergi till en energiform som kan användas.

Vid en PN-övergång finns det en positiv dopad (p-dopad) och en negativ dopad (N-dopad) skikt. Dessa skikt kan bestå av ett ämne som till exempel Si (kisel), vilket har fyra valenselektroner och kan ha sammanlagt 8 elektroner i sitt yttersta elektronskikt. När Si binder upp fler elektroner blir den n-dopad då den har överskott av elektroner. Den p-dopade delen fungerar på motsvarande sätt där till exempel ämnet In (Indium) som har tre valenselektroner blir positiv då den förlorar sina valenselektroner. När dessa två halvledare möts så kan en pn-övergång ske [4].

När ljus i form av fotoner träffar solcellens yta så kan fotonen antingen reflekteras, absorberas eller passera förbi. När fotonen absorberas av solcellens p-dopade del, slår fotoner loss elektroner från sina bindningar och med detta kan elektronerna röra sig fritt. När den fria elektronen från p-dopade delen närmar sig pn-skiktet, kommer ett elektroniskt fält skicka över elektronen till n-dopade delen som då får överskott av elektroner. Samma princip sker när en foton träffar n-dopade delen vilket slår loss fria elektroner och skapar ett elektronhål där elektronerna flyttas från n-dopade delen till p-dopade delen. Detta leder till att p-dopade delen blir mer positiv och n-dopade delen blir mer negativ. När denna pn-övergång sker så kan solcellen omvandla solens ljusenergi till en energiform som kan användas [4].

För att ta reda på vilken effekt som kan erhållas från solcellen behövs mätningar av ström I_S och spänning U_S göras. Dessa mätningar görs över solcellerna när ljuset riktas från ljuskällan på solcellerna. Med spänning och ström kan man ta reda på effekten i systemet.

$$P_{ut} = U_S \times I_S \quad (2.5)$$

P_{ut} är effekten som skapas när ljuset tags emot av mottagaren. När P_{in} och P_{ut} är kända kan följande verkningsgrad η räknas ut.

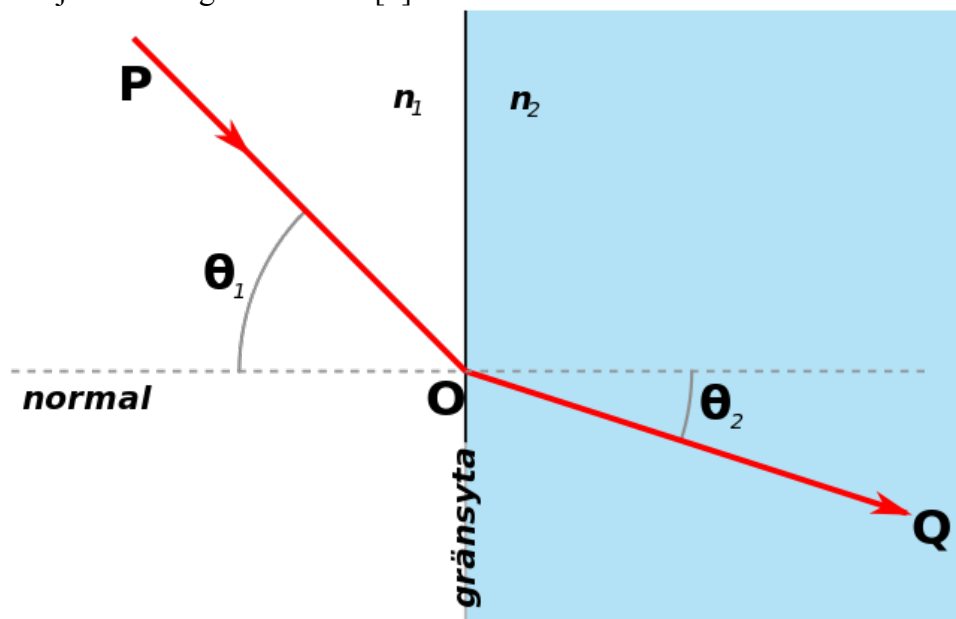
$$\eta = \frac{P_{in}}{P_{ut}} \quad (2.6)$$

2.3 Optik

I konstruktion av sändare användes och studerades två typer av optik: Fokuseringslins (konvex lins) och samlingslins.

2.3.1 Fokuseringslins

När ljuset passerar från ett medium till ett annat som i figur 2–2, blir infallsvinkel θ_1 skilt från utfallsvinkel θ_2 , detta sker på grund av att ljusets hastighet ändras och att medium 1 och medium 2 har olika brytningsindex n . Brytningsindex är förhållandet mellan ljusets hastighet i vakuum och ljusets hastighet i mediet [5].

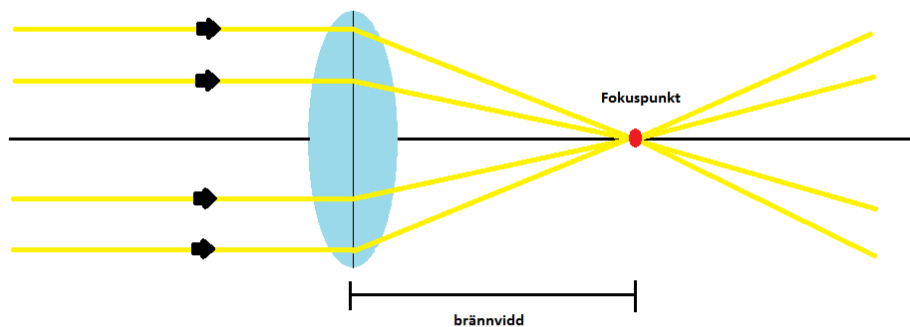


Figur 2–2 Ljusets brytning då den färdas från ett medium till ett annat [6].

Ekvationen 2.7 beskriver Snells lag där n_1 och n_2 är brytningsindex för medium 1 respektive medium 2. Brytningsindexen bestämmer avståndet mellan sändaren och mottagaren då ljuset fokuserades in på mottagarens yta.

$$n_1 \times \sin \theta_1 = n_2 \times \sin \theta_2 \quad (2.7)$$

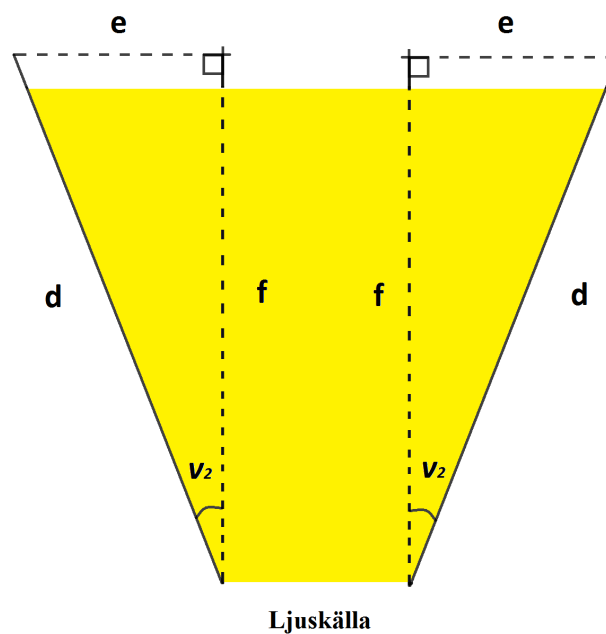
En konvex lins har en tjockare del i mitten och blir smalare längre bort från mitten se figur 2–3. Den har i uppgift att fokusera in ljusstrålar till en brännpunkt. Då ljusstrålarna som träffar den konvexa linsen bryts får de sin gemensamma fokuspunkt på ett avstånd som kallas för brännvidd [7].



Figur 2–3 Ljusets brytning vid användning av fokuseringslins.

2.3.2 Samlingslins

En samlingslins används främst åt att kollimera och minska spridningen på ljus. Kollimering innebär att olikriktade ljusstrålar som passerar genom samlingslins får parallella ljusstrålar vid en utgång. Spridningen av ljuset kommer att räknas ut med hjälp av trigonometriska funktioner [7].



Figur 2–4 visar spridningen på ljuset från ljuskällan.

Beräkning av vinkeln v för rätvinkliga trianglar som kan ses i figur 2–4 användes ekvationen

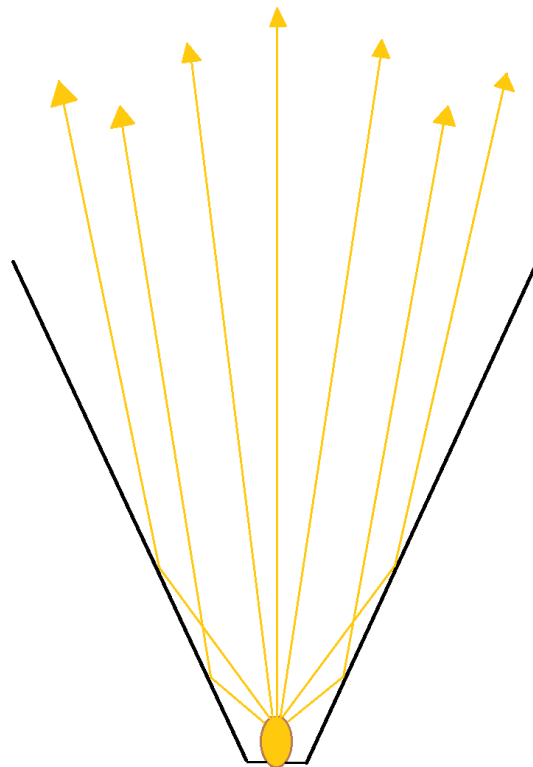
$$\cos v = \frac{b}{a} \quad (2.8)$$

där c är motstående katet, b är närliggande katet och a är hypotenusan. Ekvation 2.7 används om motstående katet b och hypotenusan a är kända. Då vinkeln v är spridningen av ljuset för en sida blir den totala spridningsvinkel två gånger vinkel v och för att hitta spridningsvinkeln genomfördes följande beräkning

$$2v = 2 \cos^{-1} \frac{b}{a} \quad (2.9)$$

2.4 Reflektor

Reflektorer har egenskapen att samla in och rikta ljus. Med en viss form på reflektorn riktades strålarna på ett sådant sätt att spridningsvinkeln på ljuset ändrades. I det här arbetet utfördes ett försök som visade om reflektorerna samlade och riktade ljuset på ett sådant sätt ljuset som skickades träffade det avgränsade området på mottagarens yta. Figur 2–5 visar generellt hur ljusstrålarna träffas och riktas utåt.



Figur 2–5 visar hur ljusstrålarna reflekteras från sändaren.

3 Metod

Materialet som användes för konstruktionen var lysdioder, solceller, samlingslins, fokuseringslins och reflektorer. Lysdioderna användes som ljuskälla (sändare) och solcellerna fungerade som mottagare för ljus. Samlingslinsen användes för att minska spridningsvinkeln och fokuseringslinsen användes för att koncentrera ljuset till mottagaren. Valen av lysdioder bestämdes med hänsyn till kostnad, spridningsvinkeln på ljuset, tillverkare, monteringsstyp och ett bestämt intervall på ljusintensitet.

Studieundersökningar genomfördes för att se vilka risker som fanns vid användning av de olika lysdioder. Sökningar genomfördes i olika lagar, litteratur, mejlkonversation med strålskyddsmyndigheterna och telefonsamtal med arbetsmiljöverket. Då användning av UV-ljus kan innebära en fara i denna undersökning gjordes en noga studie och konversation med strålskyddsmyndigheterna medans för synligt ljus så var det tillräckligt med ett samtal med arbetsmiljöverket. UV-ljus diskuterades även med arbetsmiljöverket för att få ytterligare information om vad man ska tänka på vid de tester som gjordes.

Ljuskällan konstruerades genom att löda ihop lysdioderna på ett kretskort. Till en början fanns det 6 olika kretskort där varje kretskort hade en koppling av lysdioder för en bestämd våglängd. Samlingslinsen bestämde var lysdioderna placerades på kretskorten därför att samlingslinsens konstruktion inte kunde anpassas på annat sätt.

Valet av samlingslinserna bestämdes med hänsyn till hur många lysdioder som kunde användas för samlingslinsens konstruktion. Samlingslinsen skulle behöva rymma så många lysdioder som möjligt samtidigt som spridningsvinkeln skulle vara låg. Det genomfördes även ett försök att hitta reflektorer för konstruktionen av ljuskällan. Med reflektorn är det tänkt att den också skulle minska spridningsvinkeln och bevara en del av ljuset som försvinner åt sidorna. Både reflektorn och samlingslinsen fästes fast på sändaren och var en av sändaren.

Fokuseringslinsen valdes för att testa om det gick att öka verkningsgrad genom att samla ljuset där fokuseringspunkten skulle träffa mottagaren. Fokuseringslinsen satt fritt mellan sändaren och mottagaren.

Mottagaren konstruerades efter antal solceller som krävdes för att ladda ett batteri eller för att få en lysdiod att lysa. För att den totala ytan på mottagaren ska vara så liten som möjligt valdes solceller med en liten area.

För att se om en lysdiod eller ett batteri kunde tändas respektive laddas utfördes undersökningar genom att rikta ljuskällan på ett avstånd mellan 0–20 cm från mottagaren.

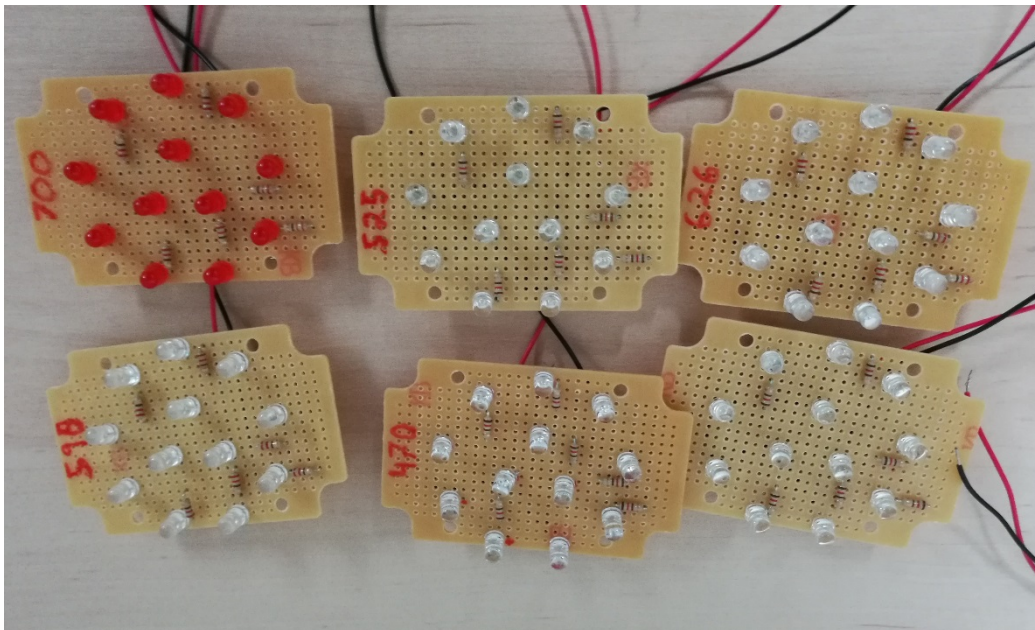
En testanläggning hade konstruerats för att på ett enkelt sätt ändra avstånd mellan sändare och mottagare. Detta var för att se hur energin påverkas vid olika avstånd mellan mottagaren och sändaren. Högsta verkningsgraden räknades ut för de olika ljuskällorna vid denna undersökning.

4 Konstruktion

4.1 Val av sändarteknologi

Ljusets som användes var inte någon fara för omgivningen förutom vid användning av UV-ljus, där särskild säkerhetsutrustning var nödvändig. Synliga ljuset bör inte riktas rakt i ögat om ljusets intensitet är hög men den bör inte göra någon skada på kort tid enligt arbetsmiljöverket. Däremot bör man använda UV-skyddade glasögon och kanske täcka huden om den exponeras för UV-ljuset under en längre tid menar arbetsmiljöverket. Strålskyddsmyndigheten hänvisade till arbetsmiljöverket och skrev även att det inte krävdes några ansökningar om tillstånd för de tester som utfördes.

För att konstruera ljuskällan användes flera lysdioder, vilket illustreras i figur 4–1. Figuren visar 6 olika ljuskällor, vilka användes som sändare. Placeringen av lysdioderna på kretskortet bestämdes av den samlingslins som användes. Olika typer av ljuskällor studerades med hänsyn till toppvåglängderna hos lysdioden. Ett ungefärligt intervall på 350nm-700nm våglängd och med ungefär 50nm skillnad mellan varje våglängd undersöktes. Valet begränsades efter vad som fanns hos de olika återförsäljarna.



Figur 4–1. Sex olika ljuskällor färdiglödda på ett kopplingskort.

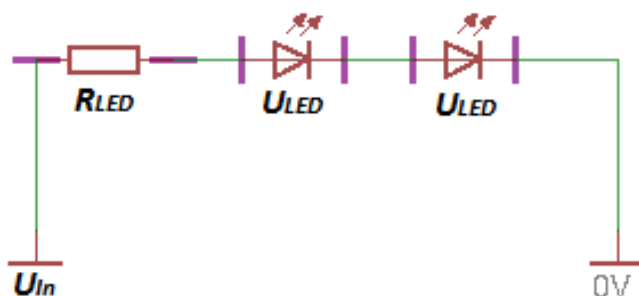
De krav som sattes förutom valet av våglängd för lysdioderna var kostnaden, spridningsvinkel, tillverkare, formen och ljusintensiteten på lysdioden. För att resultatet skulle bli jämförbart användes lysdioder av samma märke och återförsäljare. Storleken på ljusintensiteten varierade beroende på vilken lysdiod som skulle testas.

Följande lysdioder studerades.

Tillverkare / varumärke	Artikel-nummer	Våglängd	Ljusstyrka i candela (cd)	Spridningsvinkel	Spänning i volt (V)	Strömmen i milliampere (mA)	Färg
1. Bivar/Bivar	UV5TZ-390-30	390nm	0	30°	3,4	15	Violett
2. Broadcom/Avago	HLMP-CB3A-UV0DD	470nm	4,4	30°	3,2	20	Blå
3. Broadcom/Avago	HLMP-CM3A-Z10DD	525nm	16,5	30°	3,2	20	Grön
4. Broadcom/Avago	HLMP-EL3B-WXKDD	590nm	9,3	30°	2,1	20	Bärnsten
5. Broadcom/Avago	HLMP-EG3H-VX0DD	626nm	9,3	30°	2,1	20	Röd
6. Panasonic/Panasonic	LNG21-LRKR	700nm	4×10^{-3}	Okänd	2,2	20	Röd diffunderat

Tabell 4–2. Information om de valda lysdioderna.

Spänningskällan som valdes var 9V, eftersom seriekopplingen av två lysdioder krävde ungefär denna spänningen. Antalet lysdioder bestämdes efter hur många lysdioder samlingslinsen rymde, vilket resulterade i 12 lysdioder. Kopplingen genomfördes på följande sätt, två lysdioder seriekopplades tillsammans med en uträknad resistor för att rätt spänning och ström skulle passera genom lysdioderna. Därefter parallellkopplades dessa sex seriekopplingarna med varandra. Figur 4–3 illustrerar ett kopplingsschema för två seriekopplade lysdioder.



Figur 4–3. Kopplingsschemat för två seriekopplade lysdioder

Resistorn R_{LED} räknades ut med hjälp av ekvation 2.1 och 2.2. Där antalet A är två då vi har två lysdioder enligt figur 4–3. Hur stor ström och spänning varje lysdiod krävde finns att hittas i tabell 4–2.

4.2 Val av mottagarteknologi

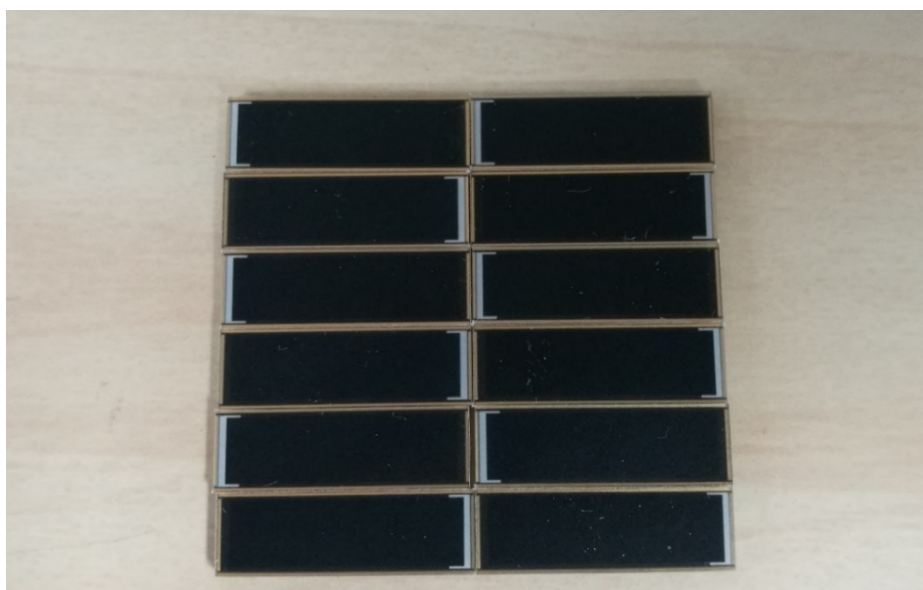
Solcellen fungerade som en mottagare ämnad att ta emot ljuset som skickades ut från ljuskällan. För att veta hur många och vilka solceller som skulle köpas, fanns ett par krav som skulle uppfyllas. Kopplingen av solcellerna krävde en liten area då ljuset skulle fokuseras till en mindre yta. Ett annat krav var att undersöka om de olika solcellstyperna hade en spektral känslighet mellan 350nm-700nm, då detta är det ungefärliga våglängdsområdet som studerades. Antalet solceller bestämdes efter vad varje solcell kunde få ut i spänning och ström. Då de flesta batterier laddas med en spänning upp till 5 volt valdes antalet solceller utifrån det. Det fanns ett par varianter av solceller och för att ta reda på vilken som passade bäst genomfördes ytterligare undersökningar avseende egenskaperna hos olika solcellers halvledarmaterial. Solcellen som slutligen valdes var IXOLAR™ SolarBIT.

Solcell	Tomgångsspänning	Max ström	Max effekt	Area
IXYS KXOB22- 12X1L-ND	630mV	37,2mA/cm ²	18,6mW/cm ²	1,56cm ²

Tabell 4–4. Värden från produktinformation för solcell.

Solcellen seriekopplades efter att två ståltrådar hade löts (ett ben för plussidan och ett för minussidan), ståltrådarna användes sedan för att koppla solcellerna. En solcell kunde generera 0,5 volt till 0,63 volt vid maximal kapacitet. För att få tillräckligt med spänning användes 12 seriekopplade solceller. En annan bidragande orsak till antalet solceller var att mottagaren nästan fick formen av en kvadrat. Den kvadratiska formen gjorde att ljuset kunde fördelas jämnare.

Solcell IXOLAR™ SolarBIT som kan ses i figur 4–5 hade en hög våglängdsberoende för våglängderna 400 nm till 900 nm innan solcellen får det svårare att omvandla energin. Detta kan ses i produktens datablad som finns tillgänglig på tillverkarens hemsida eller hos återförsäljaren.



Figur 4–5 12 Solceller IXOLAR™ SolarBIT bildar formen på mottagarsidan.

I figur 4–5 illustreras hur mottagaren placerades på en kopplingsbräda. Multimeter användes vid mätning av ström och spänning från mottagaren. Värden som lästes av användes för att räkna ut effekten från mottagaren.

4.3 Val av optik

För att mottagaren skulle kunna ta emot så mycket ljus som möjligt behövde spridningsvinkeln minimeras. De flesta ljuskällorna har en spridningsvinkel på $2\alpha = 30^\circ$, vilket i det här fallet skulle innebära att ljuset skulle hamna utanför mottagarytan. En samlingslins användes därför för att minska spridningsvinkeln och en konvex lins för att fokusera ljuset. Samlingslinsen kollimerade ljusstrålarna från lysdioderna till mottagaren. Samlingslinsen som användes kunde få ned spridningsvinkeln till 10° enligt databladet. LEDIL C13236 Sandra-12-S samlingslins som användes, var den lins som hade lägst spridningsvinkel för serien.



Figur 4–6. Samlingslins LEDIL C13236 Sandra-12-S.

Fokuseringslinsen behövde ha en så stor diameter som möjligt för att fånga in större delen av ljuset. Ljuset som fångades in av fokuseringslinsen fokuserades på mottagaren för att öka verkningsgraden. Fokuseringslins som användes illustreras i figur 4–7. För att få rätt fokuspunkt till mottagaren ställdes fokuseringslinsen på ett bestämt avstånd mellan sändaren och mottagaren.



Figur 4–7. Fokuseringslinsen som användes.

4.4 Val av reflektor

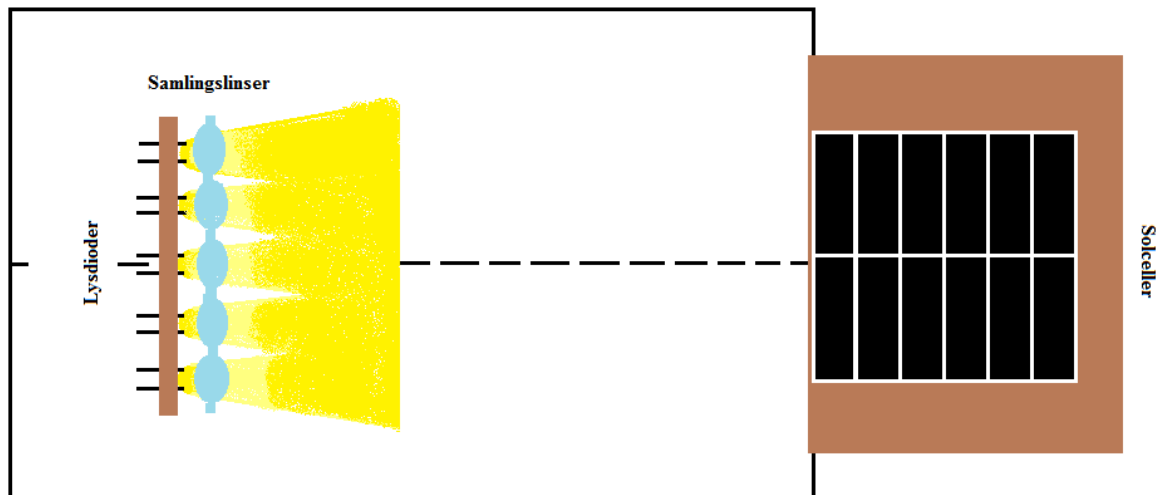
Reflektorn valdes för att passa de konstruerade ljuskällorna. Då det inte fanns tillräckligt med reflektorer för 12 lysdioder där varje reflektor passade till en lysdiod gjordes ett försök med en annan konstruktion av ljuskälla för att undersöka hur ljuset träffar mottagaren. Tio reflektorer användes för konstruktion av en ny ljuskälla. Placeringen av lysdioderna på kretskortet bestämdes av reflektorns ytterdiameter samt att samlingen av reflektorerna behövde vara cirkelformad. Några justeringar gjordes på reflektorerna för att passa varje lysdiod. Ett större hål på reflektorn gjordes för att lysdioden skulle få plats genom hålet.



Figur 4–8. Reflektor som användes.

4.5 Testplattform

Testplattformen användes för att se hur effekten ändras vid olika avstånd mellan sändare och mottagare samt om olika våglängder är bättre för längre distanser jämfört med andra våglängder. Testplattformen bestod av två A3 skrivpapper som tejpades ihop och markerades med 20 millimeters mellanrum upp till 500 millimeter. Testplattformen användes för att manuellt kunna flytta ljuskällan mellan olika distanser. Det för att se hur spänningen och strömmen ändras med avståndet. Testerna visade hur de olika ljuskällorna förhöll sig till varandra och se vilken ljuskälla som var bäst lämpad för energiöverföring via ljus. Till testplattformen användes ett stativ med klämmor som höll mottagaren på rätt plats under testerna. På sändarsidan flyttades ljuskällan manuellt mellan olika distanser.



Figur 4–9 En ritning på testplattformen

Reflektorerna som användes hade samma position som samlingslinserna i figur 4–9. Fokuseringslinsen hamnade på ett bestämt avstånd mellan mottagaren och sändaren men den togs inte med vid användning av denna testplattform.

5 Resultat

5.1 Test av spridningsvinkel

Mätningen av spridningsvinklar genomfördes i ett mörkt rum med minimalt ljusinsläpp. Då ytan på mottagaren var begränsad testades olika möjligheter att fokusera ljuset. För att testa hur ljusstrålarna spreds, riktades ljuset från ljuskällan på ett A3 papper. Ljusets spridning markerades med färgpennor på A3 pappret. Markeringarna användes för att räkna ut spridningen på ljuset. Först ritades linjer för spridningen av ljusstrålarna utan fokusering eller samlingslins. Figur 2–4 illustrerar hur ljuset spreds i förhållandet till ljuskällan, där a, b, och c var längderna i den rätvinkliga triangeln som mättes för ta reda på vinkeln mellan längderna a och b.

Mätningar genomfördes med linjal för att ta reda på sträckorna a och b som blev 10 cm respektive 9,6 cm. Vinkeln räknades ut enligt ekv. 2.6. Spridningsvinkeln blev $2v = 32.52^\circ$, vilket var ungefär detsamma som visades i databladet för lysdioderna.

5.1.1 Minska spridningsvinkel med samlingslinsen

En samlingslins placerades över lysdioderna för att mäta hur ljusstrålarna spred sig. Liknande mätningar genomfördes med samlingslinsen och denna gången spreds ljuset med en mindre vinkel, till skillnad från de tidigare mätningarna. De olika längderna a och c blev 10cm respektive 0,9cm. Längden c valdes eftersom att a och b längder var nästan lika långa, vilket bidrog till att vinkeln v kunde variera i för stor utsträckning vid minsta felmätning. Vinkeln v blev därav $5,16^\circ$ och gav spridningsvinkeln $10,33^\circ$.

5.1.2 Minska spridningsvinkel med reflektor

En del av ljuset hamnade åt sidorna medan huvuddelen av ljusstrålarna hade spridningsvinkeln 30° från sändaren. För den del av ljuset som hamnade åt sidorna användes reflektorer för att fånga upp dessa och rikta ljusstrålarna till mottagaren. Detta gav liknande resultat i spridningsvinkel, vilket kunde vara en fördel inför fortsatta mätningar. Nackdelen med dessa reflektorer och för de flesta reflektorer är att det är delar till en eller flera färdiga produkter, det vill säga, att de säljs för specifika lysdioder som passar just dessa. Det gjorde att utbudet av reflektorer var begränsat samt att de reflektorer som testades fick justeras för att passa lysdioderna och konstruktionen av ljuskällan. Reflektorerna var svåra att förflytta mellan ljuskällorna samt att det inte fanns tillräckligt av dem. Därför beslutades det att inte gå vidare med dessa.

5.1.3 Fokusering av ljus med fokuseringslins

Ljuskällan som konstruerades användes för att överföra ljus till en mottagare, där en voltmätare användes för att mäta spänningen och strömmen från mottagaren. Detta för att jämföra resultat med och utan fokusering. Då fokuseringslinsen har en brännpunkt på ett bestämt avstånd kunde inte större förändringar i avståndet göras. Testet visade att övergången av energin från ljuskällan till mottagaren med fokuseringslinsen blev betydligt sämre än utan fokuseringslinsen.

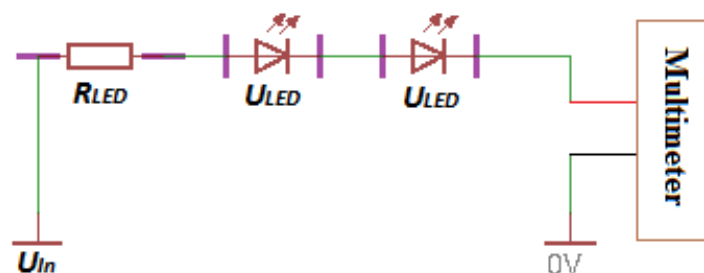
5.2 Test av solcell

Testerna av solcellerna gjordes stegvis där det först testades med en solcell för att se om det gick att få ut någon spänning och ström. När allt fungerade räknades det ut hur många solceller som behövdes kopplas ihop. Därefter gjordes ett försök att tända en lysdiod från ca 10 cm avstånd mellan ljuskälla och mottagaren, vilket fungerade. Ljuskällan var en prototyp och varken samlingslins eller fokuseringslins användes eftersom att testet var för att se om det var möjligt. Antalet solceller anpassades efter mängden spänning som en lysdiod krävde för att lysa. Lysdiodens ljusintensitet minskade med längre avstånd.

Nästa steg var att testa att ladda en smarttelefon. En USB kabel kopplades från solcellen till en smarttelefon. Smarttelefonen reagerade genom att visa att den laddades, dock långsamt. Det krävdes ett kort avstånd mellan ljuskällan och mottagaren för att batteriet skulle laddas.

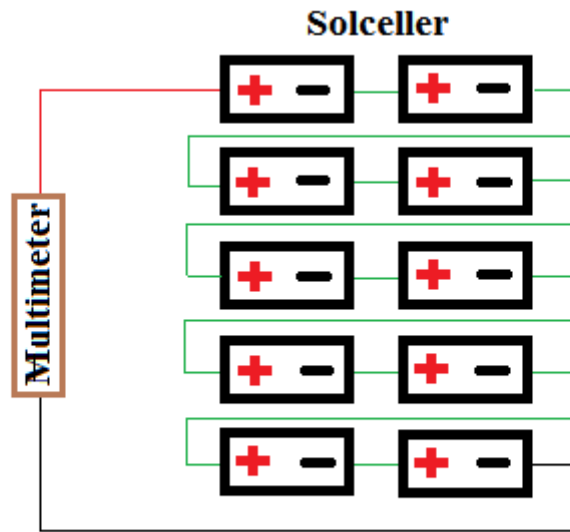
5.2.1 Distanstestning

I det här testet undersöktes hur stor verkningsgraden blev mellan det som skickas ut från strömkällan och det som togs emot av mottagaren. Testet gjordes på företagets laborationsrum med släckta lampor och minimalt ljusinsläpp från omgivningen. Mätningarna gjordes utan fokuseringslins men både med och utan samlingslins. Först lästes spänningen på ljuskällan av genom att mäta över kretsen U_{IN} till jod i figur 4–3 och därefter mättes strömmen enligt figur 5–1. Med hjälp av mätningarna på spänning och ström kunde effekten P_{in} räknas ut enligt ekvation 2.2 från ljuskällan. Mätningen av spänning och ström från mottagaren gjordes stegvis upp till avståndet 500 mm mellan sändaren och mottagaren. Mätningen gjordes på samma sätt för både strömmen och spänningen där joden från mottagaren kopplades till joden på multimeter, strömmen/spänningen kopplades till pluspolen. Det gjordes 20 mätningar av spänning och lika många för ström. För varje ljuskälla användes ett intervall på 25 mm.



Figur 5–1 visar hur mätning av strömmen gick till för ljuskällan.

P_{ut} räknades ut genom att mäta spänningen och strömmen på samma sätt då solcellerna var seriekopplade, detta kan ses i figur 5–2.



Figur 5–2 visar hur mätningen av spänningen och strömmen gjordes.

Följande diagram är resultat från ljuskällor utan samlingslins. Då våglängden 700nm gav ett dåligt resultat från början valdes den snabbt bort för vidare tester.

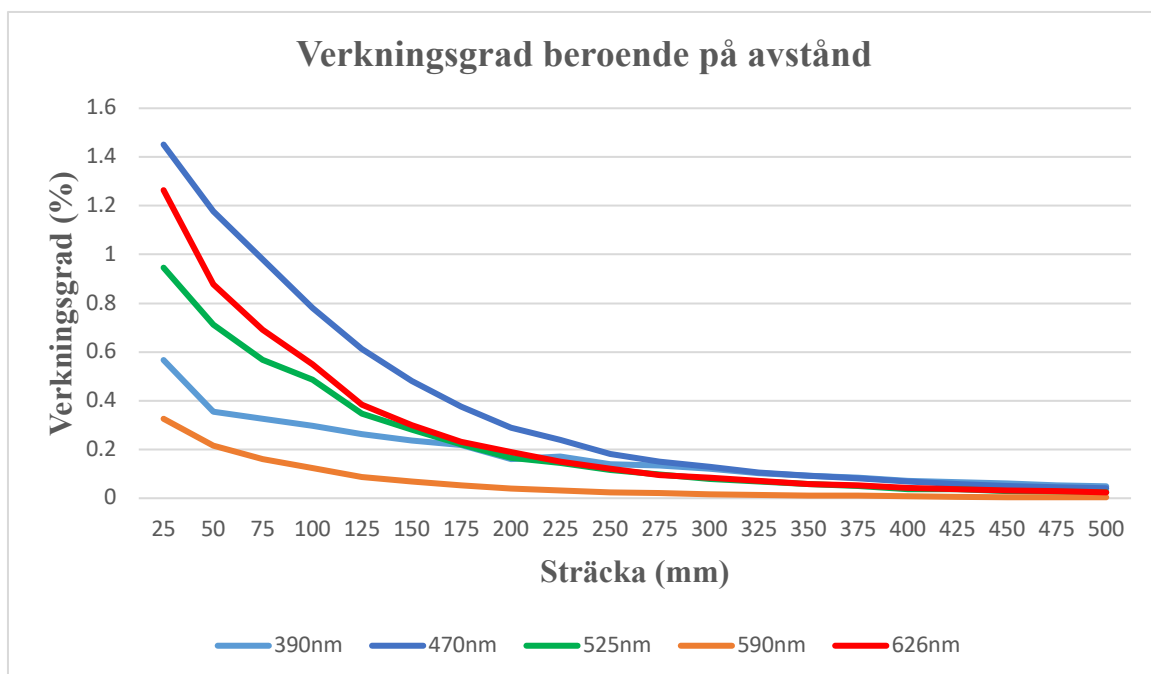


Diagram 5–3. Diagrammet visar hur verkningsgraden avtar med längre avstånd utan samlingslins

Högsta verkningsgraden mellan ljuskällans effekt och det som togs emot för de olika våglängderna kan ses i tabell 5–4. Då en resistor har kopplat på i ljuskällans kopplingsschema kan verkningsgrad aldrig bli 100% då en del av energin går åt över resistorn. Mätningen av

spänningen och strömmen och resultat av mätningarna kan ses i bilaga G och H. Effekten P_{UT} kunde fås fram av kopplingarna i bilaga A-F medan P_{IN} räknades ut genom de uppmätta värden av spänning och ström.

Våglängd (nm)	Max effekt ut P_{UT} (mW)	Max effekt in P_{IN} (mW)	Verkningsgrad (%)
390	4,5899	810	0,57
470	15,672	1080	1,45
525	10,2172	1080	0,95
590	3,52	1080	0,33
626	13,653	1080	1,26

Tabell 5–4. Högsta verkningsgraden för de olika våglängderna utan samlingslins.

Samma test som utfördes med distanstestet utfördes med samlingslinsen. Resultatet av den uträknade verkningsgraden vid olika distanser kan ses i diagram 5–5. Mätdata av spänningen och strömmen med samlingslinsen kan ses i bilaga J och K.

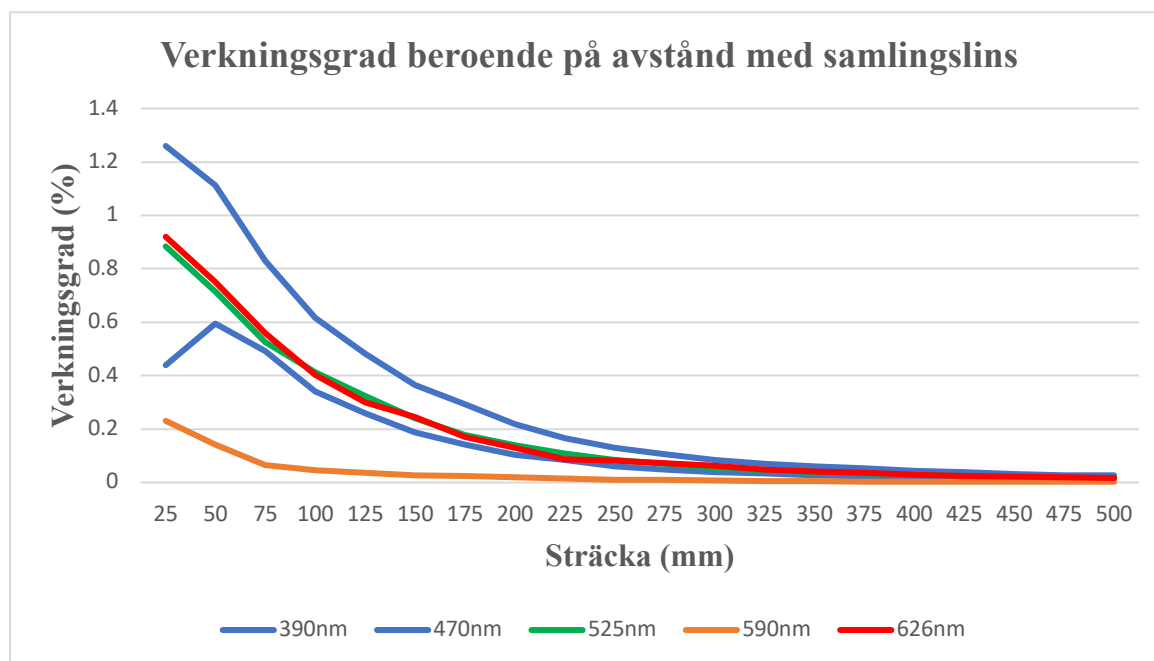


Diagram 5–5. Diagrammet visar verkningsgraden för de olika ljuskällorna vid olika distans med samlingslins.

Högsta verkningsgraden mellan ljuskällan och det som togs emot för de olika våglängderna med samlingslins kan ses i tabell 5–6.

Våglängd (nm)	Max effekt ut P_{UT} (mW)	Max effekt in P_{IN} (mW)	Verkningsgrad (%)
390	3,564	810	0,44
470	13,632	1080	1,262
525	9,5456	1080	0,884
590	2,5	1080	0,231
626	9,9375	1080	0,92

Tabell 5–6. Högsta verkningsgraden för de olika våglängderna.

6 Diskussion

Ljuskällan med LED teknik

Den högsta verkningsgraden var 1,45% för den bästa ljuskällan, vilket anses lågt. Insatt effekt var ca 810mW för ljuskällan med våglängden 390nm och för resten av ljuskällorna var den insatta effekten 1080mW. Helst skulle effekten från mottagaren som var ca 16 mW vara i höjd med maximala effekten som kunde fås ut av de alla solceller enligt databladet, vilket var ca 344 mW. Vid avstånd på ca 25 mm mellan ljuskällan och mottagaren hamnade det mesta av ljuset på mottagaren men det skedde stora förluster av ljus. Förlusterna då ljuset skickades från ljuskällan till mottagaren kan bero på flera faktorer. Mycket av ljuset från ljuskällan kan ha reflekterats bort av mottagaren eller att lysdiodens lins absorberade en del av ljusets energi. Solcellens våglängdsberoende visade inte någon större skillnad för de våglängder som studerades men resultatet av testerna som gjordes i denna rapporten visade något annat. Det kan dels bero på att testerna kan ha utförts på olika sätt eller att företaget som tillverkade solcellerna ville se om solcellerna enbart gav utslag för vissa våglängder.

Samlingslins, fokuseringslins och reflektor

Det var utmärkande att samlingslinsen och fokuseringslinsen som användes inte gav ett bättre resultat enligt mätdata. Det finns dock utvecklingsmöjlighet då ljuset ska kunna överföras vid längre distanser.

Fokuseringslinsen behövde ligga på ett bestämt avstånd mellan ljuskällan och mottagaren. Det gjorde att den valdes bort under arbetets gång, då ett av kraven för konstruktionen från företaget var att överföringen av ljuset skulle fungera vid olika avstånd. En justerbar fokuseringslins hade kunnat testats för att se om bättre resultat kunde uppnås.

Reflektorer är något som bör studeras närmare då dessa kan fungera bättre när man vill samla in mycket ljus. Det enda testet som utfördes visade att ljuset inte reflekterades åt sidorna. Det kan resultera i att verkningsgraden höjs en aning. Det bör dock beaktas att det kan finnas andra bidragande orsaker till att verkningsgraden var låg.

Personliga utlåtande kring felkällor vid distanstester

Då distansen mellan ljuskällan och mottagaren justerades manuellt kan resultatet avvika något när mätningarna av spänning och ström utfördes. En del ljus som träffar mottagaren reflekteras bort från mottagaren vilket gör att mottagaren inte tog tillvara på allt ljus som träffar ytan. Vid användning av samlingslinsen kan det tydligt urskiljas att en del av ljusstrålarna avviker eller reflekteras åt andra riktningar. Detta på grund av att just den samlingslinsen som användes var tillämpad för andra typer av lysdioder än de som rekommenderades i produktbladet.

Resultatet av två specifika våglängder (590nm) och (626nm) var enligt produktbladet identiska förutom färgen på ljuset. Trots likheten varierar resultatet mellan dessa två. Enligt databladet på mottagaren har denna en liknande verkningsgrad för alla våglängder mellan 400nm och 700nm. Orsaken till den stora skillnaden är okänd.

7 Slutsats

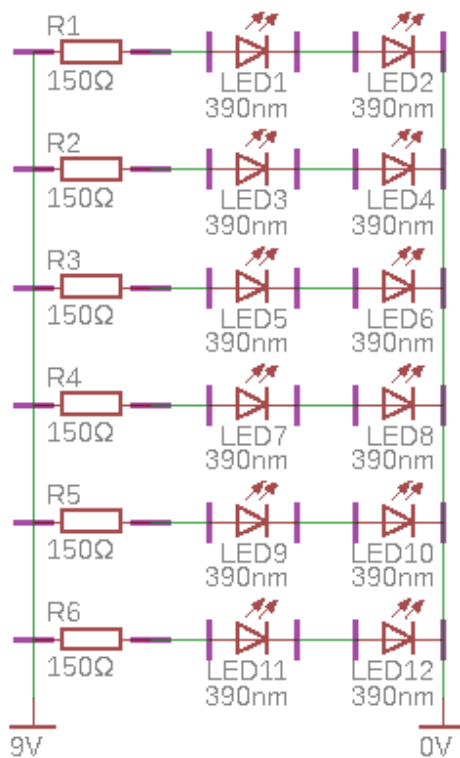
Syftet uppnåddes dels genom att det visade sig att det fanns möjligheter att ladda ett batteri eller tända en lampa. Effekten som erhöles var tillräckligt hög för att en lysdiod och ett batteri skulle ge utslag. Laddning av mobilbatteriet hade dock tagit lång tid. Max utslag av effekten bestämdes av antalet solceller som kopplades ihop. Mottagaren valdes för att fånga in så mycket ljus som möjligt med en hög verkningsgrad. Verkningsgraden var väntat att den skulle vara låg som i resultatet. Helst önskades en högre verkningsgrad med hjälp av samlingslins eller att den skulle hjälpa något på längre distanser, vilket inte fungerade tillräckligt bra. Däremot finns det många andra typer av linser att testa som kan ge en mindre spridningsvinkel på ljuset och bättre ljusgenomsläpp. Den våglängd som gav bäst resultat var 470nm och hade en verkningsgrad på 1,45%. En kombination av både reflektor och samlingslins eller annan optik kan möjligtvis öka verkningsgraden på distans. Däremot att få en högre verkningsgrad än den maximala som har uppnåtts från kortaste avståndet blir svårt. I sådana fall skulle en bättre ljuskälla behövas. Tyvärr gick det inte att göra på längre avstånd vilket man helst ville göra med hjälp av optik och reflektorer. Då mottagaren fungerade bra skulle jag rekommendera att företaget använder sig av en annan typ av ljuskälla för framtida arbete. Ett exempel är att testa med laser och möjligtvis använda våglängderna som gav bäst resultat av testerna som utfördes.

Källförteckning

- [1] “Broccoli - Broccoli.” [Online]. Available: <http://www.broccoli.se/>. [Accessed: 14-Feb-2018].
- [2] G. Held, *Introduction to light emitting diode technology and applications*. CRC Press, 2009.
- [3] S. Dutta Gupta, Ed., *Light Emitting Diodes for Agriculture*. Singapore: Springer Singapore, 2017.
- [4] S. A. Kalogirou and S. A. Kalogirou, “Photovoltaic Systems,” in *Solar Energy Engineering*, Elsevier, 2014, pp. 481–540.
- [5] S.-T. Wu and H. Ren, *Introduction to adaptive lenses*. Wiley, 2012.
- [6] Johan Arvelius, “File:Snells lag.svg - Wikimedia Commons,” 2006. [Online]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Snells_lag.svg.
- [7] M. J. Riedl, “Optical Elements,” in *Optics for Technicians*, SPIE PRESS, 2015, pp. 9–38.

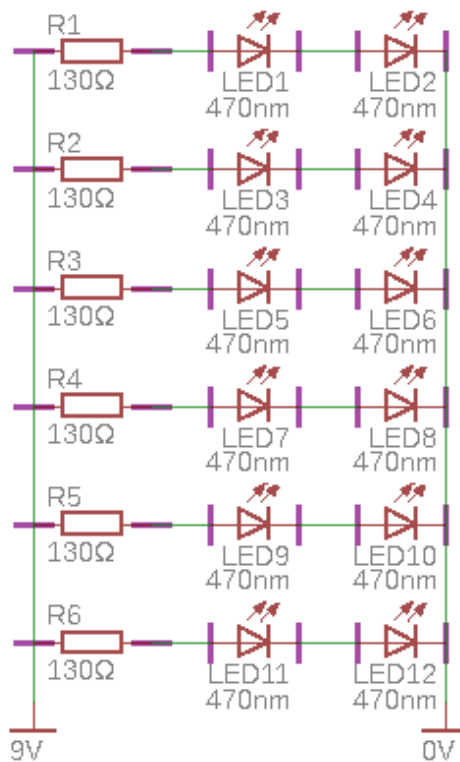
Bilaga A

Kopplingsschema för Bivar UV5TZ-390-30



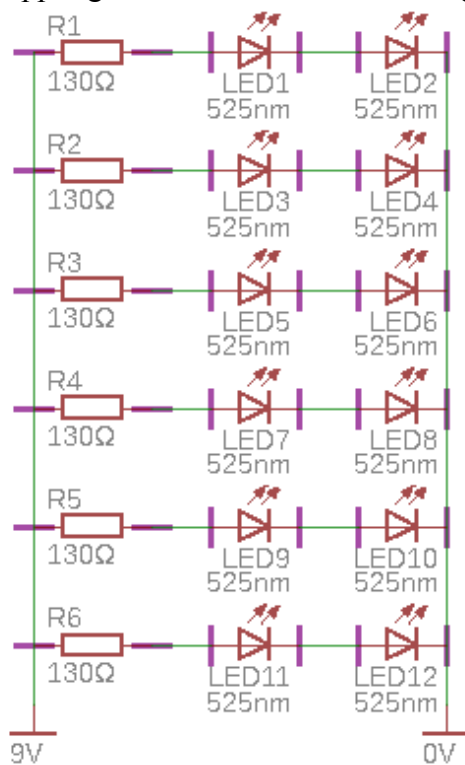
Bilaga B

Kopplingsschema för Broadcom/Avago HLMP-CB3A-UV0DD



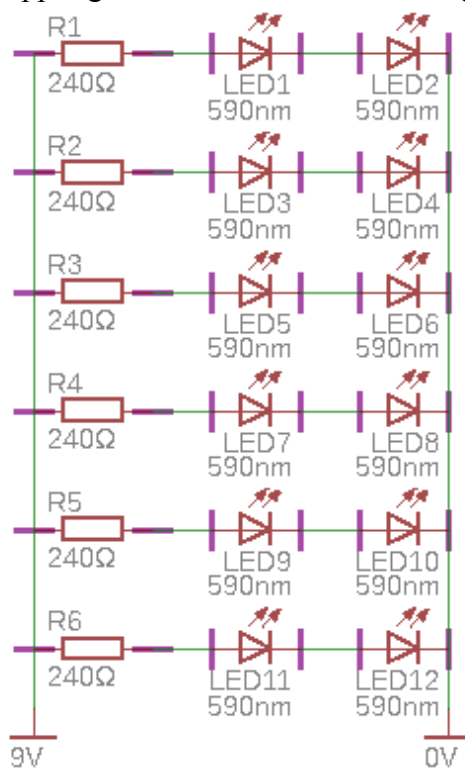
Bilaga C

Kopplingsschema för Broadcom/Avago HLMP-CM3A-Z10DD



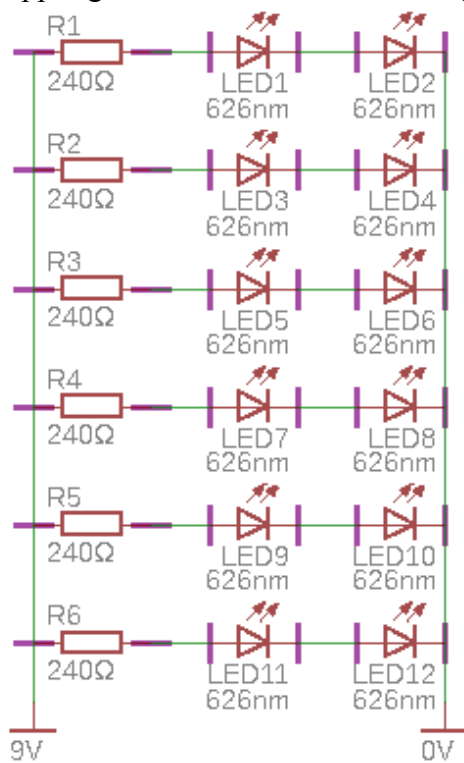
Bilaga D

Kopplingsschema för Broadcom/Avago HLMP-EL3B-WXKDD



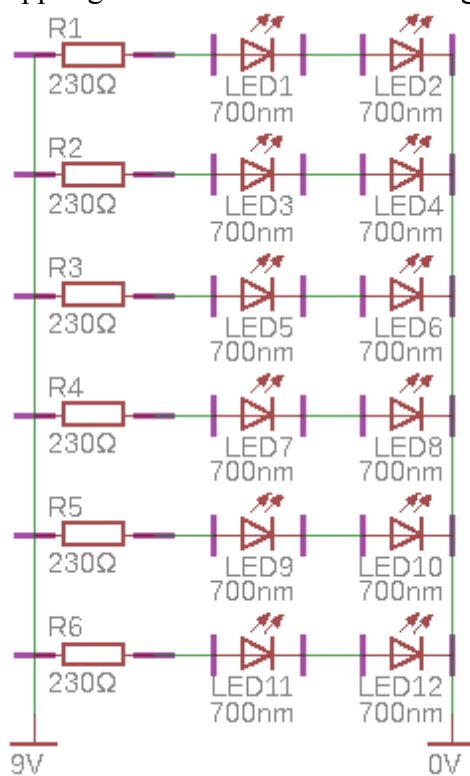
Bilaga E

Kopplingsschema för Broadcom/Avago HLMP-EG3H-VX0DD



Bilaga F

Kopplingsschema för Broadcom/Avago LNG21LRKR



Bilaga G

Resultat vid mätning av spänning vid olika distanser och ljuskällor. Mätningarna utfördes utan optik och mättes från 25mm till 500mm.

Sträcka (mm)	390nm (V)	470nm (V)	525nm (V)	590nm (V)	626nm (V)	700nm (V)
25	5,81	6,53	6,23	5,5	6,15	2,99
50	5,52	6,36	6,06	5,1	5,93	2,54
75	5,4	6,15	5,9	4,82	5,75	2,29
100	5,22	6,02	5,7	4,57	5,65	1,92
125	5,1	5,85	5,51	4,32	5,38	1,66
150	4,94	5,63	5,29	4,1	5,2	1,35
175	4,8	5,42	5,08	3,9	5,01	1,27
200	4,69	5,21	4,88	3,7	4,85	1,12
225	4,65	5,06	4,72	3,53	4,63	0,98
250	4,5	4,88	4,53	3,36	4,46	0,88
275	4,39	4,65	4,4	3,21	4,33	0,68
300	4,29	4,59	4,24	3,06	4,17	0,56
325	4,18	4,46	4,1	2,93	4,03	0,51
350	4,08	4,3	3,97	2,8	3,92	0,45
375	3,98	4,2	3,88	2,69	3,82	0,4
400	3,88	4,06	3,74	2,54	3,68	0,36
425	3,79	3,96	3,65	2,43	3,58	0,35
450	3,72	3,86	3,54	2,34	3,47	0,35
475	3,65	3,74	3,45	2,24	3,33	0,3
500	3,58	3,68	3,36	2,16	3,3	0,28

Bilaga H

Mätdata av strömmen på distanserna mellan 25mm till 500mm utan optik.

Sträcka (mm)	390nm (mA)	470nm (mA)	525nm (mA)	590nm (mA)	626nm (mA)
25	0,79	2,4	1,64	0,64	2,22
50	0,52	2	1,27	0,46	1,6
75	0,49	1,72	1,04	0,36	1,3
100	0,46	1,4	0,85	0,29	0,99
125	0,42	1,13	0,68	0,22	0,77
150	0,39	0,92	0,58	0,18	0,62
175	0,37	0,75	0,47	0,15	0,5
200	0,33	0,6	0,37	0,12	0,42
225	0,3	0,51	0,33	0,1	0,35
250	0,25	0,4	0,28	0,08	0,29
275	0,25	0,35	0,24	0,07	0,24
300	0,23	0,3	0,2	0,06	0,22
325	0,2	0,25	0,18	0,05	0,19
350	0,18	0,23	0,16	0,04	0,16
375	0,17	0,21	0,14	0,04	0,15
400	0,15	0,18	0,11	0,03	0,13
425	0,14	0,16	0,1	0,02	0,11
450	0,13	0,14	0,09	0,02	0,1
475	0,12	0,13	0,08	0,02	0,09
500	0,11	0,12	0,08	0,02	0,08

Bilaga I

Resultatet från tidigare mätdata för spänning och ström användes för att beräkna effekten utan samlingslins.

Sträcka (mm)	390nm (mW)	470nm (mW)	525nm (mW)	590nm (mW)	626nm (mW)
25	4,5899	15,672	10,2172	3,52	13,653
50	2,8704	12,72	7,6962	2,346	9,488
75	2,646	10,578	6,136	1,7352	7,475
100	2,4012	8,428	4,845	1,3253	5,5935
125	2,142	6,6105	3,7468	0,9504	4,1426
150	1,9266	5,1796	3,0682	0,738	3,224
175	1,776	4,065	2,3876	0,585	2,505
200	1,5477	3,126	1,8056	0,444	2,037
225	1,395	2,5806	1,5576	0,353	1,6205
250	1,125	1,952	1,2684	0,2688	1,2934
275	1,0975	1,6275	1,056	0,2247	1,0392
300	0,9867	1,377	0,848	0,1836	0,9174
325	0,836	1,1475	0,738	0,1465	0,7657
350	0,7344	0,989	0,6352	0,112	0,6272
375	0,6766	0,882	0,5432	0,1076	0,573
400	0,582	0,7308	0,4114	0,0762	0,4784
425	0,5306	0,6336	0,365	0,0486	0,3938
450	0,4836	0,5404	0,3186	0,0468	0,347
475	0,438	0,4862	0,276	0,0448	0,2997
500	0,3938	0,4416	0,2688	0,0432	0,264

Bilaga J

Mätdata av spänningen som erhöles av mottagaren vid olika distanser.

Sträcka (mm)	390nm (V)	470nm (V)	525nm (V)	590nm (V)	626nm (V)
25	5,4	6,4	6,28	5	6,25
50	5,6	6,35	6,03	4,65	6
75	5,4	6,1	5,8	4,4	5,75
100	5,1	5,89	5,57	4,12	5,52
125	4,9	5,66	5,37	3,87	5,25
150	4,6	5,48	5,08	3,65	4,95
175	4,39	5,28	4,9	3,4	4,74
200	4,18	5	4,7	3,26	4,52
225	3,98	4,85	4,48	3,1	4,4
250	3,75	4,7	4,31	2,94	4,25
275	3,61	4,52	4,13	2,78	4,1
300	3,41	4,38	3,98	2,6	3,95
325	3,32	4,23	3,9	2,5	3,81
350	3,15	4,13	3,77	2,38	3,7
375	3,05	4,03	3,69	2,28	3,6
400	2,91	3,91	3,56	2,16	3,45
425	2,82	3,82	3,44	2,07	3,4
450	2,71	3,68	3,37	1,96	3,3
475	2,61	3,63	3,27	1,84	3,14
500	2,52	3,6	3,19	1,75	3,01

Bilaga K

Mätdata av strömmen som erhöles av mottagaren vid olika distanser med samlingslins.

Sträcka (mm)	390nm (mA)	470nm (mA)	525nm (mA)	590nm (mA)	626nm (mA)
25	0,66	2,13	1,52	0,5	1,59
50	0,86	1,9	1,28	0,33	1,35
75	0,74	1,47	0,98	0,24	1,05
100	0,54	1,13	0,8	0,17	0,79
125	0,43	0,92	0,65	0,13	0,62
150	0,33	0,72	0,51	0,11	0,49
175	0,26	0,6	0,39	0,09	0,39
200	0,2	0,47	0,32	0,08	0,31
225	0,17	0,37	0,26	0,07	0,26
250	0,13	0,3	0,21	0,05	0,21
275	0,11	0,25	0,18	0,04	0,19
300	0,09	0,21	0,15	0,04	0,17
325	0,08	0,18	0,13	0,03	0,14
350	0,07	0,16	0,11	0,03	0,12
375	0,06	0,14	0,1	0,03	0,11
400	0,05	0,12	0,09	0,02	0,09
425	0,04	0,11	0,08	0,02	0,08
450	0,04	0,09	0,07	0,02	0,07
475	0,03	0,08	0,06	0,01	0,07
500	0,02	0,08	0,05	0,01	0,06

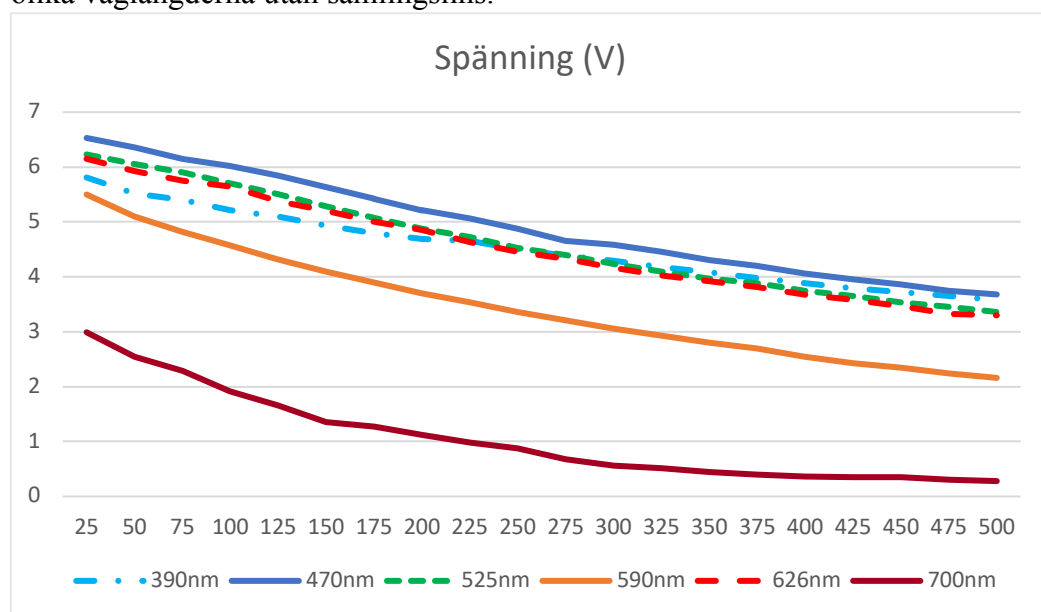
Bilaga L

Den uträknade effekten med samlingslins vid olika distanser mellan ljuskällan och mottagaren.

Sträcka (mm)	390nm (mW)	470nm (mW)	525nm (mW)	590nm (mW)	626nm (mW)
25	3,564	13,632	9,5456	2,5	9,9375
50	4,816	12,065	7,7184	1,5345	8,1
75	3,996	8,967	5,684	1,056	6,0375
100	2,754	6,6557	4,456	0,7004	4,3608
125	2,107	5,2072	3,4905	0,5031	3,255
150	1,518	3,9456	2,5908	0,4015	2,4255
175	1,1414	3,168	1,911	0,306	1,8486
200	0,836	2,35	1,504	0,2608	1,4012
225	0,6766	1,7945	1,1648	0,217	0,924
250	0,4875	1,41	0,9051	0,147	0,8925
275	0,3971	1,13	0,7434	0,1112	0,779
300	0,3069	0,9198	0,597	0,104	0,6715
325	0,2656	0,7614	0,507	0,075	0,5334
350	0,2205	0,6608	0,4147	0,0714	0,444
375	0,183	0,5782	0,369	0,0684	0,396
400	0,1455	0,4692	0,3204	0,0432	0,3105
425	0,1128	0,4202	0,2752	0,0414	0,272
450	0,1084	0,3312	0,2359	0,0392	0,231
475	0,0783	0,2904	0,1962	0,0184	0,2198
500	0,0504	0,288	0,1595	0,0175	0,1806

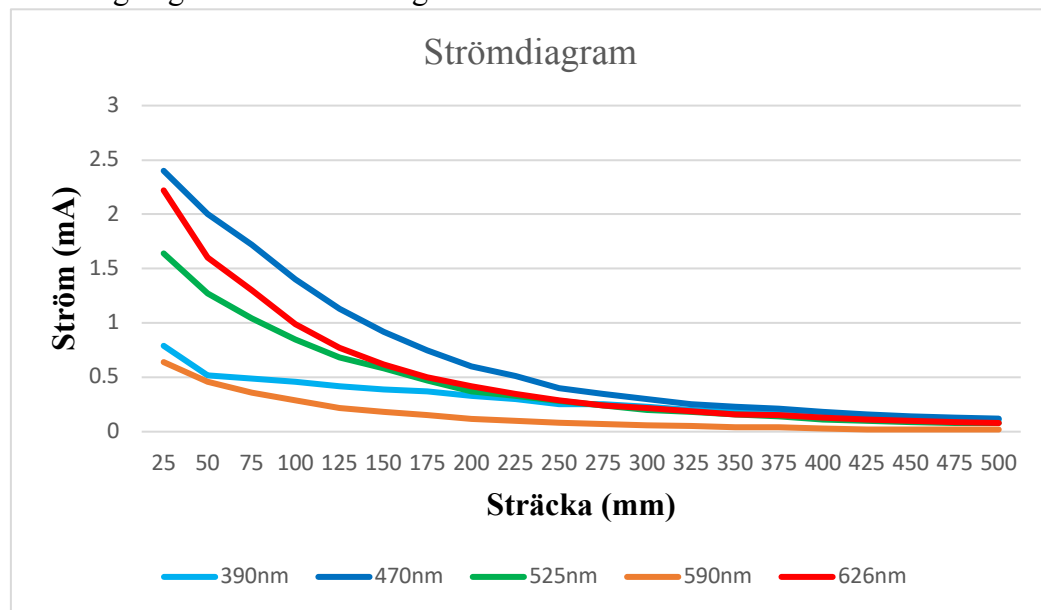
Bilaga M

Diagrammet visar hur spänningen (V) ändras med avseende på distans och de olika våglängderna utan samlingslins.



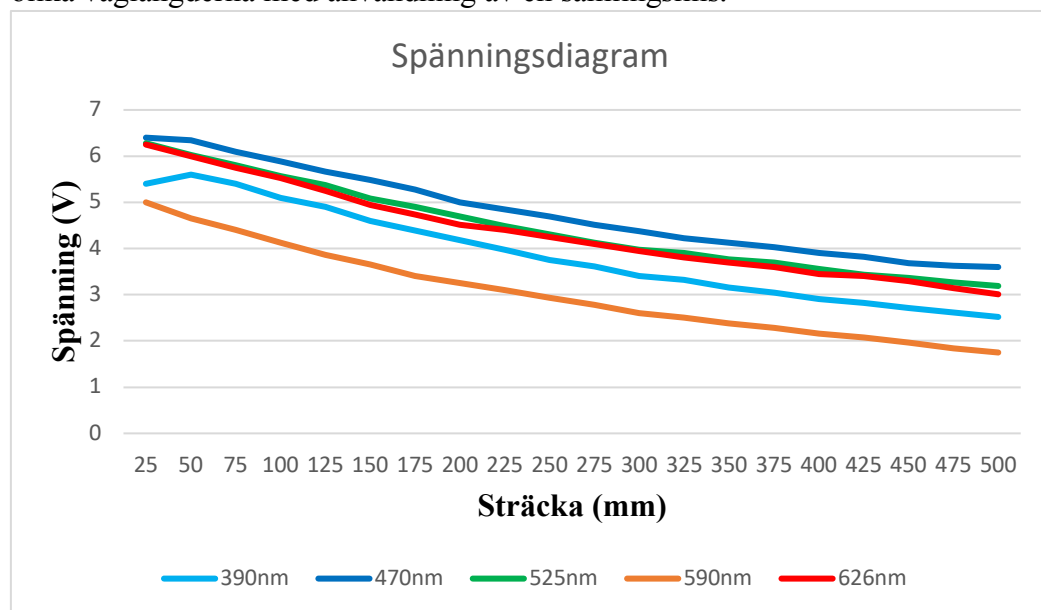
Bilaga N

Diagrammet visar hur strömmen (mA) ändras i förhållandet till distansen för de olika våglängderna utan samlingslins.



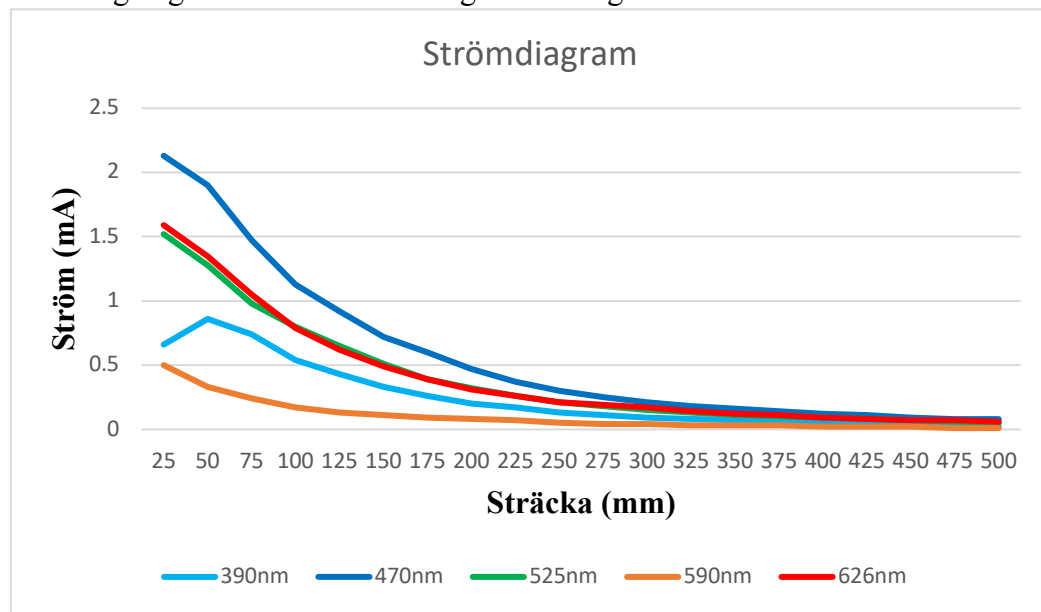
Bilaga O

Diagrammet visar hur spänningen (V) ändras med avseende på distans och de olika våglängderna med användning av en samlingslins.



Bilaga P

Diagrammet visar hur strömmen (mA) ändras i förhållandet till distansen för de olika våglängderna med användning av samlingslins.



Bilaga Q

Diagrammet visar den uträknade effekten (mW) utan samlingslins.

