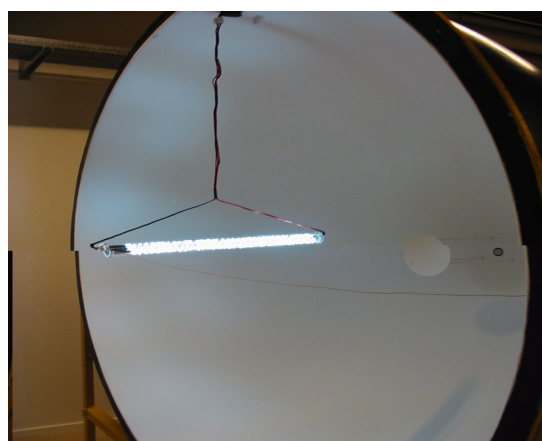
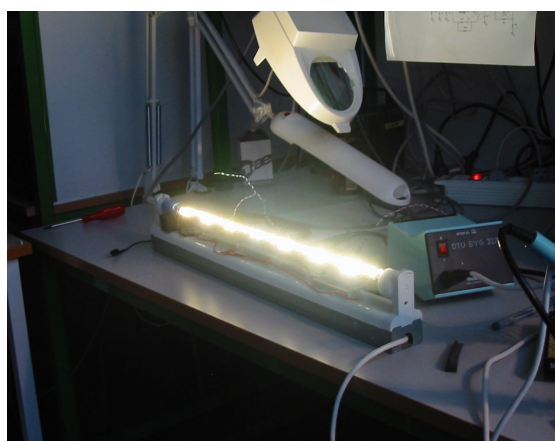
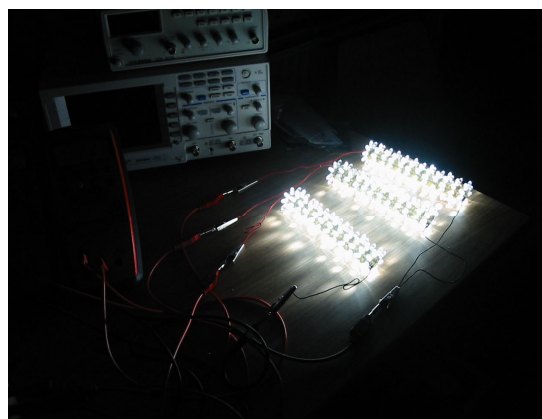


# LED baseret lyskilde til erstatning af lysstofrør

Slutrapport for PSO-projekt 336-021



Udført under ledelse af:  
**Allan Krogh Jensen, AKJ Inventions**

I perioden: 1/1-2004 – 31/1-2005

# Indholdsfortegnelse

Indholdsfortegnelse.....	2
Indledning .....	4
Tidsplan .....	6
1 Patentering af opfindelsen .....	8
2 Kravspecifikation.....	10
2.1 Prototypen med hvide lysdioder .....	10
2.2 Prototypen med gule lysdioder .....	11
2.3 Prototypen med UV lysdioder .....	11
2.4 Prototypen med varm hvide lysdioder.....	12
3 Valg af egnede lysdioder .....	13
3.1 Beregning af lysstrøm for lysdioder .....	13
3.2 Lyskvalitetparametrene.....	14
3.3 Hvide lysdioder .....	16
3.4 Varmhvide lysdioder .....	17
3.5 Gule lysdioder.....	17
4 Test af egnede lysdioder .....	18
4.1 DC testen.....	18
4.1.1 Forsøgsopstillingen .....	18
4.1.2 Testprocedure og dataopsamling .....	19
4.1.3 Vinderen i "Varm Hvid"-kategorien .....	19
4.1.4 Vinderen i "Hvid"-kategorien.....	20
4.1.5 Vinderen i "Gul"-kategorien .....	21
4.2 PWM testen .....	21
4.2.1 Forsøgsopstillingen .....	21
4.2.2 Testprocedure og dataopsamling .....	22
4.2.3 PWM testkonklusion .....	23
5 Design af prototyperne .....	24
5.1 Den hvide prototype.....	24
5.1.1 Radialplanerne .....	24
5.1.2 Radialplangrupperne .....	25
5.1.3 Ensretning af netspændingen.....	27
5.1.4 Indbygning i rør.....	28
5.1.5 Test og fremvisning .....	28
5.2 Den varm-hvide prototype .....	29
5.2.1 Første prototype .....	30
5.2.2 Anden prototype og de nye radialplaner.....	32
5.2.3 Det bærende kobberør og endestykkerne .....	34
5.2.4 Strømforsyningen .....	35
5.2.5 Test og fremvisning .....	38
5.3 Den gule prototype .....	39
5.3.1 Radialplanerne .....	40
5.3.2 Strømforsyningen .....	40
5.3.3 Test .....	42
6 Test af prototyperne.....	43
6.1 Måling af lysstrøm.....	43
6.2 Måling af spektral effektfordeling .....	44
6.3 Test af den varm hvide prototype .....	46
6.4 Test af den hvide prototype .....	48

6.5	Test af den gule prototype .....	49
6.6	Testkonklusion.....	51
	Fremtidsperspektivering.....	52
	Konklusion .....	54
	Litteraturliste .....	56
	Bilagsliste.....	56
	Appendix.....	57
	Diagram for den hvide prototype .....	57
	Diagram for den varm hvide prototype .....	58
	Diagram for den gule prototype.....	59
	Diagram for radialplan til den hvide prototype .....	60
	Diagram for radialplan til den gule prototype.....	60

## Indledning

For ca. to år siden begyndte de første kraftige hvide lysdioder at indtage markedet for alvor. De var begyndt at blive attraktive til belysning, fremfor blot indikation, som lysdioder ellers traditionelt har været benyttet til. Jeg fandt de nye lysdioder interessante fordi de har en lang række fordele i forhold til traditionelle lyskilder. Bl.a. meget længere levetid, og deres lysudbytte bliver også stadig bedre og bedre.

Inspireret af at anvende disse kraftige lysdioder til belysning, kom jeg på den idé at konstruere en lyskilde, bestående af lysdioder, der skulle kunne indsættes som erstatning for traditionelle lysstofrør, i et normalt lysstofrør armatur. Jeg begyndte straks at fundere over hvordan lyskilden kunne realiseres i praksis. En hurtig søgning blandt de offentliggjorte patenter som findes på internettet, viste at opfindelsen ikke var set før. Det gav mig for alvor blod på tanden, og lyst til at realisere opfindelsen.

Velvidende at opfindelsen tilsyneladende var ny, var det meget oplagt at få den beskyttet hurtigst muligt. Inden andre måtte komme på samme idé. Beskyttelse og evt. patentering af en opfindelse koster imidlertid rigtig mange penge. Derfor tog jeg i første omgang kontakt til Opfinderkontoret på Teknologisk Institut, for at få råd og vejledning, og evt. økonomisk støtte. De tvivlede, trods min indledende søgning, dog på at opfindelsen havde opfindelseshøjde. Dvs. om den udskilte sig tilstrækkelig fra allerede kendte opfindelser. De havde desuden ikke midler til at få foretaget en egentlig nyhedsundersøgelse, men foreslog at jeg selv granskede nogle flere patenter, og evt. fik foretaget en nyhedsundersøgelse af Patent og Varemærke Styrelsen.

Jeg søgte derfor blandt endnu flere patenter, i de internationale patentdatabaser ([www.espacenet.dk](http://www.espacenet.dk) og [www.delphion.com](http://www.delphion.com)), men fandt stadig ingen tegn på at opfindelsen var kendt. Teknologisk Institut ville stadig kræve en nyhedsundersøgelse, for at gå videre ind i opfindelsen. Men som studerende havde jeg ikke råd til at satse 15.000 kr. på at få opfindelsen nyhedundersøgt. Hvis det nu skulle vise sig at den ikke var ny, ville alle pengene jo være spildt. Derfor forsøgte jeg at skaffe finansiering til nyhedsundersøgelsen hos en anden investor.

DTU Innovation fandt jeg frem til fordi jeg til dagligt studerer på DTU. De har primært til opgave at hjælpe resultaterne af den forskning, som foregår på DTU, ud i virkeligheden. Jeg tog kontakt til dem, og vi holdte et møde, hvor jeg præsenterede min idé. De var umiddelbart begejstrede for idéen, men ønskede at undersøge sagen nærmere, før de evt. ville financiere en nyhedsundersøgelse. Få dage efter meldte de tilbage at de gerne ville betale en nyhedsundersøgelse af opfindelsen. Nyhedsundersøgelsen blev foretaget af patentbureauet Budde Schou Ostenfeldt, og tog ca. en mdr.

Resultatet af nyhedsundersøgelsen må siges at være positivt. Den konkluderede, at opfindelsen ikke var set før, og at der derfor var tale om en ny og patenterbar opfindelse. Til trods for denne positive tilbagemelding,

ønskede DTU Innovation ikke at investere flere penge i projektet, til en egentlig patentansøgning. Begrundelsen var at opfindelsen var for lavteknologisk til deres portefølje, som hovedsageligt består af bioteknologiske og nanoteknologiske opfindelser. Så på baggrund af den positive nyhedsundersøgelse begyndte jeg nu selv at skrive en patentansøgning, udfra Patent og Varemærkestyrelsens vejledningsskrivelse.

Jeg indleverede patentansøgningen den 1/5-2003, og betalte selv de 3000 kr. det koster, for den indledende behandling. Velvidende at opfindelsen nu havde fået prioritetsdato, var der ikke andet at gøre end at vente på resultatet, og så imellemtiden prøve at skaffe finansiering til den videre udvikling.

I sommeren 2003 faldt jeg over en artikel i ugebladet Ingeniøren, hvor ELFOR (foreningen af danske elselsbaber) indkaldte ansøgninger om økonomisk støtte, til projekter omhandlende energibesparelse. Støtten var målrettet imod store projekter, udført af store virksomheder, men jeg forsøgte alligevel, igennem mit enkeltmandsfirma AKJ Inventions, at udarbejde en støtte ansøgning. Jeg søgte om et beløb på 160.000 kr., udaf den samlede pulje på 25 mio. kr. Denne pulje er finansieret af de såkaldte PSO-midler (Public Service Obligation), der opkræves via elregningen, fra alle elforbrugere, og er øremærket til forskning og udvikling i elsektoren.

Planen var at de 160.000 kr. skulle bruges til videreudvikling og beskyttelse af min opfindelse. Jeg vurderede at projektet ville tage 550 timer at udføre, hvilket dog senere viste sig at være alt for lidt! Ansøgningen blev indleveret i september 2003, og i december fik jeg meddelelse om at der ville blive tildelt støtte til projektet. Da udviklingen af et lysdiode baseret lysstofrør er sædeles studierelevant for min uddannelse til civil elektroingeniør, fik jeg samtidig oprettet projektet som et specialkursus, svarende til 10 ECTS-points. Derved fik jeg tilknyttet Poul Erik Pedersen som vejleder. Han er ekspert i belysningsteknik, ved testinstituttet Delta Lys & Optik, og derudover ekstern tilknyttet lektor ved DTU.

Denne rapport beskriver PSO-projekt: 336-21 "LED baseret lyskilde til erstatning af lysstofrør", som blev påbegyndt 1/1-2004, og afsluttet 31/1-2005.

---

Allan Krogh Jensen, 31/1-2005

## Tidsplan

Før projektets opstart blev der udarbejdet nedenstående tidsplan, hvor aktiviteterne i de enkelte uger er specificeret. Første halvdel af året er primært afsat til forarbejde, test af lysdioder, og patentering. Anden halvdel af året er primært afsat til konstruktion af prototyperne, test af disse, samt rapportering. I foråret, samt op til jul, er der holdt nogle uger fri, for at kunne få tid til at forberede mig til eksamnerne i forbindelse med mit studie.

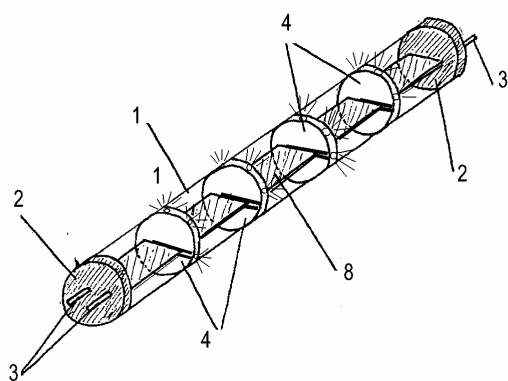
2004

Uge	Dato	Opgave
1	1/1-4/1	-
2	5/1-11/1	Møde med IPB vedr. udarbejdelse af PCT-patentansøgning
3	12/1-18/1	Indhentning af data for forskellige lysdioder
4	19/1-25/1	Indhentning af data for forskellige lysdioder
5	26/1-1/2	Revidering af PCT-patentansøgningen
6	2/2-8/2	Revidering af PCT-patentansøgningen
7	9/2-15/2	Oprettelse af projektet som special kursus på DTU
8	16/2-22/2	Indhentning af data for forskellige lysstofrør
9	23/2-29/2	Indhentning af data for forskellige lysstofrør
10	1/3-7/3	Kravspecifikation for prototyperne
11	8/3-14/3	Poul Erik Pedersens review af kravspecifikationen
12	15/3-21/3	Revidering af kravspecifikationen
13	22/3-28/3	Færdiggørelse og indlevering af PCT-patentansøgning
14	29/3-4/4	-
15	5/4-11/4	-
16	12/4-18/4	-
17	19/4-25/4	-
18	26/4-2/5	Fakturering af hidtidige udgifter til ELFOR
19	3/5-9/5	Detaljeret tidsplan
20	10/5-16/5	Indhentning af data for forskellige lysdioder
21	17/5-23/5	Indhentning af data for forskellige lysdioder
22	24/5-30/5	Indhentning af data for forskellige lysdioder
23	31/5-6/6	Indhentning af data for forskellige lysdioder
24	7/6-13/6	Valg af bedst egnede dioder ud fra teoretiske beregninger
25	14/6-20/6	Valg af bedst egnede dioder ud fra teoretiske beregninger
26	21/6-27/6	Indkøb af udstyr til og komponenter 1. Prototype
27	28/6-4/7	Konstruktion af 1. Prototype
28	5/7-11/7	Forsøg med forskellige LEDs og LED placeringer
29	12/7-18/7	Perioderapportering til ELFOR
30	19/7-25/7	Forsøg med forskellige LEDs og LED placeringer
31	26/7-1/8	Forsøg med forskellige strømforsyningsprincipper
32	2/8-8/8	Design af 2. prototype
33	9/8-15/8	Design af 2. prototype

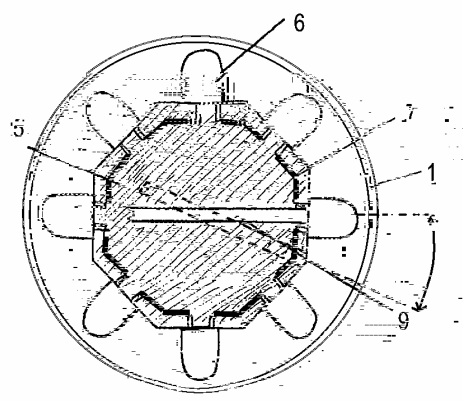
34	16/8-22/8	Indkøb af udstyr og komponenter til 2. prototype
35	23/8-29/8	Konstruktion af 2. prototype
36	30/8-5/9	Fremvisning af prototyperne på ELTECH2004 messen
37	6/9-12/9	Fakturering af hidtidige udgifter til ELFOR
38	13/9-19/9	Egen test og evt. Modificering af 2. prototype
39	20/9-26/9	Egen test og evt. Modificering af 2. prototype
40	27/9-3/10	Indlevering af prototype til test hos Delta
41	4/10-10/10	Rapportering
42	11/10-17/10	Rapportering
43	18/10-24/10	Rapportering
44	25/10-31/10	Rapportering
45	1/11-7/11	Rapportering
46	8/11-14/11	-
47	15/11-21/11	-
48	22/11-28/11	-
49	29/11-5/12	-
50	6/12-2/12	-
51	13/12-19/12	Aflevering af projektrapport til Poul Erik Pedersen, DTU
52	20/12-26/12	Afsluttende perioderapportering til ELFOR

# 1 Patentering af opfindelsen

Patentansøgningen som jeg indleverede 1/5-2003, havde jeg som sagt selv skrevet, på baggrund af nyhedsundersøgelsen udført af Budde Schou Ostenfeldt. Sidst på året 2003 fik jeg så en tilbagemelding om at patentansøgningen kolliderede med to allerede eksisterende patenter, et tysk og et amerikansk, der i store træk omhandlede indbygning af lysdioder i gennemsigtige rør. Trods Budde Schou Ostenfeldt positive nyhedsundersøgelse, havde jeg altså fået skrevet en patentansøgning som var for bredt dækkende.



Figur 1-1: Tegning af opfindelsen, anvendt i patentansøgningen.



Figur 1-2: Tværsnit af røret, med et såkaldt radialplan og lysdioderne i midten.

Der var ikke andet at gøre end at få patentansøgningen skrevet om, og for ikke at gøre skaden værre, vurderede jeg at det burde gøres af en professionel patentagent. For samtidig at kunne beholde prioritetsdatoen fra 1/5-2003, skulle det undgås at skrive en helt ny ansøgning fra bunden. Problemet med at få en patentagent til at skrive ansøgningen, er at det koster en hel del penge, og det har jeg pt. Ikke som studerende. Men heldigvis havde jeg ansøgningen om PSO-støtte til behandling hos ELFOR, så jeg så tiden an, og håbede på at få et positivt svar.

Da jeg fik lovning om støtte til projektet, fra ELFOR, gik jeg straks igang med at finde en patentagent, som for en mindst mulig pris ville omformulere min patentansøgning. Valget faldt på Knud Raffnsøe fra Internationalt Patent Bureau (IPB). Han påbegyndte omformuleringen ud fra de to nyopdagede patenter, og indleverede den nye ansøgning som en PCT-patentansøgning. Dvs. en som, hvis den går igennem, gælder i alle industrialiserede lande i verden (ca. 130). PCT-ansøgningen blev indleveret 24/3-2004.

I sommers (2004) blev jeg imidlertid kontaktet af et firma kaldet Schott Termofrost, der havde læst en artikel i Jyllands Posten, hvor mit projekt kort blev nævnt. Se presseomtale på den vedlagte CD-ROM. Schott Termofrost producerer og sælger køle- og fryseskabsdøre til næsten alle supermarkeder i Europa. I disse glasfacader, som dørene jo er, sidder der en mængde lysstofrør til at belyse fødevarerne inde i køle/fryserummet. Lysstofrør har den ulempe at jo koldere omgivelserne er, desto mindre lys udsender de. Derfor er



de monteret inde i en termoiserende kappe. Heri varmes luften op, for at der skal komme nok lys ud af lysstofrøret. Schott Termofrost havde fået interesse i mit projekt, netop fordi lysdioder er ideelle i kolde omgivelser (de lyser bedre jo koldere det er), og fordi min opfindelse kan indsættes som direkte erstatning for lysstofrør, i alle de køle/fryseskabs døre, som Schott Termofrost allerede har leveret igennem årene. Derfor ville de gerne se en prototype så snart jeg havde en klar, med henblik på evt. at lægge nogle flere penge i projektet.

I efteråret 2004, havde PCT-patentansøgningen været til behandling hos det Europæiske Patent Kontor (EPO), og jeg fik svar tilbage. Det viste sig imidlertid at der var dukket flere patenter op, som min patentansøgning lå for tæt op af. Min patentagent Knud Raffnsøe, mente dog stadig at det var muligt at patentere opfindelsen, ved at omskrive og afgrænse ansøgningen yderligere. Vigtigst af alt mente han stadig at det var til nytte, selvom patentet ville blive begrænset en smule. Derfor gik han endnu engang igang med at omskrive ansøgningen, stadig med samme prioritetsdato. Den reviderede ansøgning blev indleveret 1/12-2004.

18 mdr. efter prioritetsdatoen, skal en patentansøgning offentliggøres. Det skete for min ansøgning d. 11/11-2004, ved siden af at ansøgningen var ved at blive omskrevet. Så da den sidst reviderede ansøgning blev indeleveret, blev den offentliggjort med det samme, istedet for den tidligere. Dette offentliggjorte patent, er vedlagt som bilag. Patent er pt. kun midlertidigt gældende, indtil september 2005. Herefter skal der specificeres nærmere hvilke lande patentet skal gælde i, og det koster ekstra penge. Hvilket der ikke er medregnet i dette projekt.

Schott Termofrost har fået demonstreret to af prototyperne, og er ganske begejstret, selvom der stadig skal en del udvikling til før de kan anvendes kommercielt. Den 15/2-2005 skal en af prototyperne vises på en stor køle/frysemesse i Düsseldorf, som Schott Termofrost deltager i. Det er håbet at der her bliver skabt så meget interesse, omkring opfindelsen, at Schott Termofrost vælger at lægge noget kapital i projektet, således at det kan blive udviklet og beskyttet yderligere.

## 2 Kravspecifikation

Der skal udvikles tre forskellige prototyper, som alle udnytter kraftige lysdioder. De sigter hver især på at erstatte en specifik type lyskilde. Første prototype skal erstatte almindelige hvide lysstofrør, som bla. anvendes i kontorer, lagerhaller og til udendørsbelysning. Med hensyn til udendørsbelysning, er lysstofrøret i skarp konkurrence med de gulige højtryk-natrium lamper, som har et væsentligt lavere energiforbrug. Anden prototype sigter derfor netop på at kunne konkurrere med disse højtryk-natrium lamper. Tredie prototype skulle, i første omgang, imodsætning til de to forrige ikke bruges til belysning, men derimod til UV stråling i solarier, og skulle derfor erstatte de traditionelle solarierør. Tredie prototype blev dog senere istedet ændret til at skulle erstatte varm hvide lysstofrør.

### 2.1 Prototypen med hvide lysdioder

Denne prototype skal udgøre en mulig erstatning for almindelige traditionelle hvide lysstofrør, som anvendes mange steder. Kravene til den er fundet ved at samle lystekniske data for en række lysstofrør i et regneark (Lysstofrør.xls).

Lyskilden skal have en farvetemperatur på mellem 2700 K og 6500 K, og have et Ra-index (Farvegengivelsesevne) på min. 51, for at kunne leve op til den lyskvalitet et almindeligt lysstofrør har. I følge Dansk Standard 700 er kravet til kunstig belysning på arbejdsplader dog imidlertid fastsat til et Ra-index på min. 80. For at prototypen skal kunne opfylde denne standard, skærpes kravet derfor til et Ra-index på min. 80.

Traditionelle lysstofrør har gennemsnitlig et lysudbytte på ca. 64 lm/W, og en gennemsnitlig levetid på 10.000 timer. Eftersom denne prototype gerne skal være bedre en et lysstofrør på netop disse områder, skal disse parametre bare være så høje som muligt.

Udfra de fundne krav, findes en samlet optimeringsfaktor til brug ved valg af de egnede lysdioder. Udtrykket for denne faktor er angivet herunder, og vil senere blive implementeret i et regneark:

```
=IF((Farvetemp >= 2700) AND (Farvetemp <= 6500) AND (Ra >= 80);  
    Lysudbytte*(Levetid/10000); 0)
```

Hvilket betyder at optimeringsfaktoren er produktet af lysudbyttet og levetiden, divideret med 10000 for at give dem nogenlunde samme vægt. Dette gælder dog kun hvis kravene til farvetemperatur og Ra-index er opfyldt, ellers bliver optimeringsfaktoren 0.

## **2.2 Prototypen med gule lysdioder**

Denne prototype skal udgøre en mulig erstatning for de gule højtryk-natrium lamper, som efterhånden bliver mere og mere almindelige til bl.a. gade- og stibelysning. Kravene til den er fundet ved at samle lystekniske data for en række højtryk-natrium lamper i et regneark (Højtryk Natrium.xls).

Lyskilden skal have en farvetemperatur på mellem 2000 K og 2550 K, og have et Ra-index (Farvegengivelsessevne) på min. 25, for at kunne leve op til den lyskvalitet en højtryk-natrium lampe har.

Højtryk-natrium lamper har gennemsnitlig et lysudbytte på ca. 111 lm/W, og en gennemsnitlig levetid på 16.000 timer. Eftersom denne prototype gerne skal være bedre end en højtryk-natrium lampe på netop disse områder, skal disse parametre være så høje som muligt.

Ud fra de fundne krav, findes en samlet optimeringsfaktor til brug ved valg af de egnede lysdioder. Udtrykket for denne faktor er angivet herunder, og vil senere blive implementeret i et regneark:

```
=IF((Farvetemp >= 2000) AND (Farvetemp <= 2550) AND (Ra >= 25);  
    Lysudbytte*(Levetid/10000); 0)
```

Hvilket betyder at optimeringsfaktoren er produktet af lysudbyttet og levetiden, divideret med 10000 for at give dem nogenlunde samme vægt. Dette gælder dog kun hvis kravene til farvetemperatur og Ra-index er opfyldt, ellers bliver optimeringsfaktoren 0.

## **2.3 Prototypen med UV lysdioder**

Denne prototype skal udgøre en mulig erstatning for solarierør. Kravene til den er fundet ved at samle lystekniske data for en række solarier i et regneark (UV Solarierør.xls).

Lyskilden må max. have et UVB-output (forbrændende stråling) på 2,8 %, for at kunne leve op til den stålingskvalitet som et traditionelt solarierør har.

Solarierør har gennemsnitlig et UVA-output (brunene stråling) på ca. 24 % af den samlede elektriske effekt som afsættes i dem. De har typisk en levetid på ca. 600 timer. Eftersom denne prototype gerne skal være bedre et traditionelt solarierør på netop disse områder, skal disse parametre være så høje som muligt.

Ud fra de fundne krav, findes en samlet optimeringsfaktor til brug ved valg af de egnede lysdioder. Udtrykket for denne faktor er angivet herunder, og vil senere blive implementeret i et regneark:

```
=IF((UVB <= 2.8); UVA*(Levetid/10000); 0)
```

Hvilket betyder at optimeringsfaktoren er produktet af UVA-outputtet og levetiden, divideret med 10000 for at give dem nogenlunde samme vægt. Dette gælder dog kun hvis kravet til UVB-strålingen er opfyldt, ellers bliver optimeringsfaktoren 0.

Det blev senere valgt at droppe prototypen med UV-lysdioder. UV-lysdioder giver ganske enkelt alt for lidt effekt, i forhold solarierør. Så det vil kræve flere tusinde lysdioder i et enkelt rør, for at få samme effekt.

## **2.4 Prototypen med varm hvide lysdioder**

I stedet for at lave en prototype med UV-lysdioder, blev det besluttet at lave en med varm hvide lysdioder. Denne prototype skal udgøre en mulig erstatning for almindelige traditionelle varm-hvide lysstofrør, som anvendes mange steder, hvor der er større krav til lyskvaliteten. Kravene til den er fundet ved at samle lystekniske data for en række lysstofrør i et regneark

Lyskilden skal have en farvetemperatur på mellem 2800 K og 3300 K, og have et Ra-index (Farvegengivelsesevne) på min. 90, for at kunne leve op til den lyskvalitet et almindeligt varm-hvidt lysstofrør har.

Traditionelle lysstofrør har gennemsnitlig et lysudbytte på ca. 64 lm/W, og en gennemsnitlig levetid på 10.000 timer (økonomisk levetid). Eftersom denne prototype gerne skal være bedre en et lysstofrør på netop disse områder, skal disse parametre være så høje som muligt.

Ud fra de fundne krav, findes en samlet optimeringsfaktor til brug ved valg af de egnede lysdioder. Udtrykket for denne faktor er angivet herunder, og vil senere blive implementeret i et regneark:

```
=IF((Farvetemp >= 2800) AND (Farvetemp <= 3300) AND (Ra  
>= 90);  
    Lysudbytte*(Levetid/10000); 0)
```

Hvilket betyder at optimeringsfaktoren er produktet af lysudbyttet og levetiden, divideret med 10000 for at give dem nogenlunde samme vægt. Dette gælder dog kun hvis kravene til farvetemperatur og Ra-index er opfyldt, ellers bliver optimeringsfaktoren 0.

### 3 Valg af egnede lysdioder

Efter at have udarbejdet en kravspecifikation for prototyperne, gennemses verdensmarkedet for at finde de bedst egnede lysdioder til de tre forskellige prototyper. Det er så meningen at der skal hjemkøbes eksemplarer af de 3-4 bedst egnede lysdioder til hver af de tre prototyper, så de kan testes nærmere. Inden det endelige valg om hvilke lysdioder der skal anvendes til de enkelte prototyper.

Det blev hurtigt klart at der pt. Ikke er nogen idé i at konstruere LED-rør med UV-lysdioder, til erstatning af solarierør. UV-lysdioderne på markedet er ganske enkelt alt for svage, til at kunne konkurrerer med traditionelle solarierør. Underligt nok, eftersom de fleste hvide lysdioder i virkeligheden er UV-lysdioder med en eller flere fosforlag udenpå.

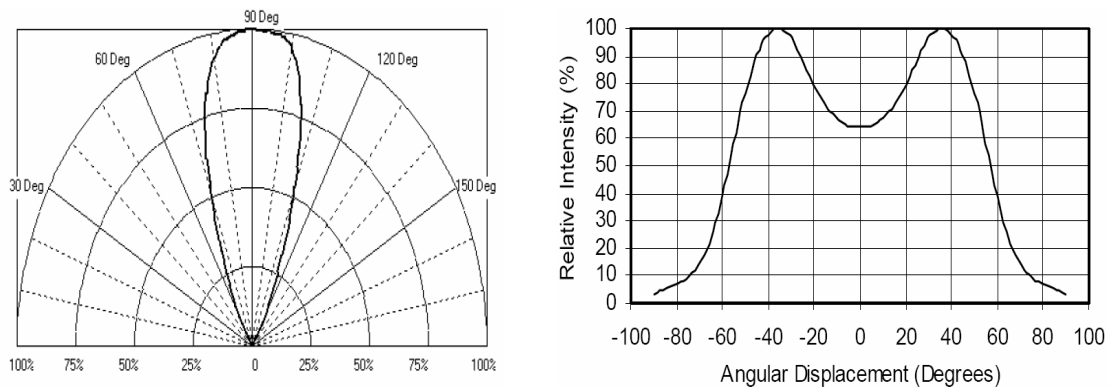
I stedet for at lave en prototype med UV-lys, besluttede jeg som sagt at lave en ekstra prototype med hvidt lys. Således at der bliver en prototype optimeret efter max. lysudbytte, og en optimeret efter max. lyskvalitet (varmhvid). Akkurat som det er kendt fra lysstofrørene.

Parametrene som skal afgøre hvilke lysdioder der er mest velegnet er: lysudbyttet [ $\text{lm/W}$ ], Ra-index og farvetemperatur [ $\text{K}$ ]. De kan ikke altid læses direkte ud fra databladene. Derfor må de beregnes ud fra de givne data. Som f.eks. lysspredningsmønster og spektralfordeling. Disse beregninger er beskrevet nærmere i de følgende afsnit. De fundne lysdioder og deres data, er henholdsvis samlet i regnearkene "Hvide Lydioder.xls" og "Gule Lydioder.xls", som findes på den vedlagte CD-ROM.

#### 3.1 Beregning af lysstrøm for lysdioder

I datablade for lysdioder angives som oftest kun diodens lysintensitet, eller lysstyrke, som det også kaldes. Dvs. hvor kraftigt lysdioden lyser i den retning hvor den lyser kraftigst. Enheden for lysintensitet er candela (cd), men angives mest i form af millicandella (mcd), svarende til 0,001 cd.

For at kunne sammenligne det samlede lys fra en lysdiode med andre lysdioder, eller med andre belysningskilder, som f.eks. lysstofrør, er det nødvendigt at kende det totale lys fra lysdioden. Det totale lys fra en lyskilde er defineret som lysstrømmen, med enheden lumen (lm). Lysstrømmen er den vægtede strålingsstrøm fra en given lyskilde. Den vægtede strålingsstrøm er produktet af en del af strålingen, der udsendes inden for det synlige område og øjetsfølsomhed for den enkelte bølgelængde. Den udsendte strålingsstrøm, og således også lysstrømmen, reduceres generelt løbende igennem lyskilders levetid.



Figur 3-1: Eksempler på grafer for lysdioders udstrålmønster.

For lysdioder, som jo ideelt set, er punktluskilder, kan lysstrømmen beregnes ud fra lysintensiteten og udstrålmønstret. Der som oftest begge er angivet i databladet for lysdioden. Udstrålmønstret eller "Beam Pattern"/"Radiation Pattern", som det tit benævnes på engelsk, er som oftest angivet i form af en graf. Se eksemplerne herover. Hvor den relative udstrålingsstyrke, er givet som en værdi imellem 0 og 1, eller 0 og 100 %, af den angivne lysintensitet.

For at beregne lysstrømmen ( $\Phi$ ), skal grafen for udstrålmønstret aflæses i tilpas små intervaller, typisk 5 grader, som relative værdier imellem 0 og 1. Disse aflæste værdier betegnes herefter med tabellen  $R(\alpha)$ , hvor  $\alpha$  er halvvinklen. Lysstrømmen kan derefter beregnes med følgende formel:

$$\Phi = I \cdot \sum_{\alpha} \left( 2\pi \cdot \sin\left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right) \cdot \frac{\pi}{180} \cdot dV \cdot R(\alpha) \right)$$

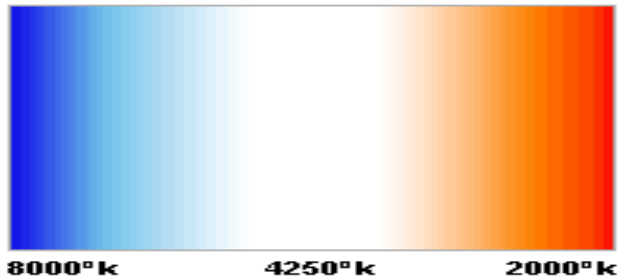
Hvor  $I$  er lysdiodens lysintensitet i candella (cd), som er angivet i databladet.  $dV$  er intervallet imellem de forskellige halvvinkler, som her er sat til 5 grader. Halvvinkelen  $\alpha$ , går fra 0 til 180 grader (i princippet kun 90 grader max. for lysdioder), i intervaller af 5 grader. Beregningerne er implementeret i praksis, i form af regnearkene: "Hvide Lysdioder.xls" og "Gule Lysdioder.xls".

### 3.2 Lyskvalitetsparametrene

Som allerede nævnt bliver kvaliteten af lyset fra lysstofrør, og dermed også de prototyper, som skal udvikles i dette projekt, bedømt på baggrund af to parametre: Ra-index og farvetemperatur. I dette afsnit vil disse parametre blive beskrevet nærmere. Der vil dog ikke blive gået i detaljer om hvordan de hver især beregnes, da det er en meget omfattende procedure, som er uden for dette projekts rammer.

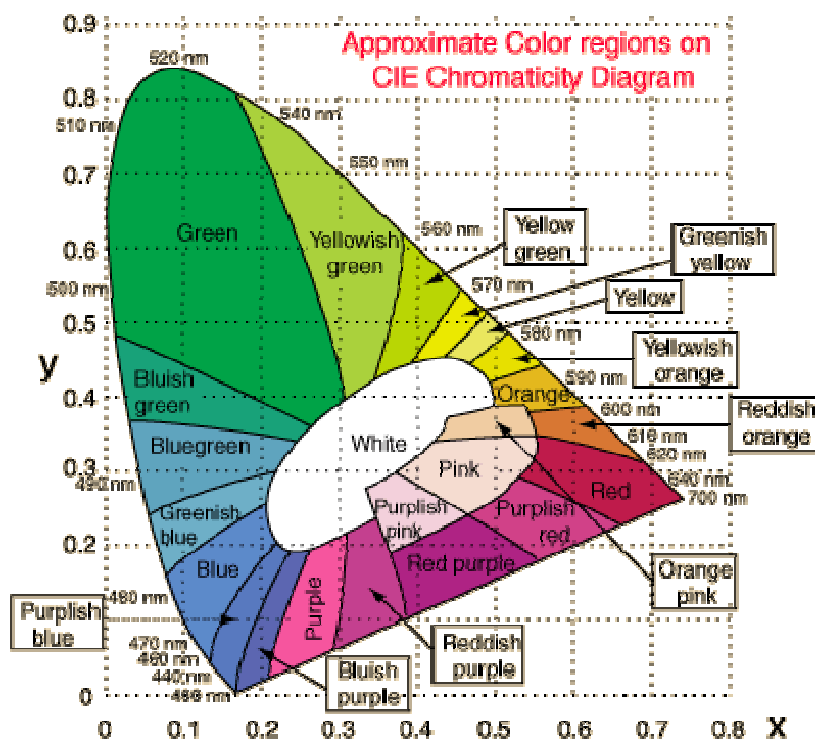
Ra-indexet, eller farvegengivelsesindexet som det også kaldes, er baseret på en subjektiv sammenligning af 8 internationalt anerkendte farveprøver belyst med samme farvetemperatur (beskrives senere) af henholdsvis en referencelyskilde og den lyskilde som skal testes. Farvegengivelsesindexet angiver lyskildens evne til at gengive disse referencefarver korrekt. Skalaen

går fra 0 til 100, hvor værdien 100 betyder optimal farvegengivelse i forhold til referencen. I praksis foregår måling af Ra-indexet dog oftest ved at måle/aflæse den relative spektrale effektfordeling, og så beregne Ra-indexet udfra det. Det er også sådan det foregår i dette projekt. Beregningerne er relativt omfattende, og foretages derfor af et specialudviklet program, som Delta Lys & Optik er i besiddelse af.



Figur 3-2: Farverne som svarer til de enkelte farvetemperature. Bemærk at lave temperaturer svarer til varme farver, og omvendt.

Farvetemperatur for en lyskilde, måles i Kelvin (K), og er defineret som den temperatur et stykke kul skal opvarmes til, for at udsende lys i en specifik farve. Sammenhængen imellem temperaturen på kullet, og den udsendte lysfarve ses på diagrammet herover. Farvetemperatur begrebet blev opfundet af William Kelvin, og måles derfor i SI-enheden for temperatur: K (Kelvin). Der som bekendt er en absolut temperatur skala, hvor 0 svarer til  $-273\text{ C}$  (Celcius). To lyskilder kan have samme farvetemperatur, men vidt forskellige spektrale effektfordelinger (beskrives senere). Høje farvetemperaturer benævnes "kolde", mens lavere farvetemperaturer benævnes "varme". Der er således, desværre, ingen ligefrem sammenhæng mellem begreberne "kold" og "varm", og begrebet farvetemperatur.



Figur 3-3: Kromaticitetsdiagrammet, med kromaticitetskoordinaterne for de enkelte farver.

Lysfarve er et ofte brugt synonym for farvetemperatur, men kan også være et mere præcist udtryk. Lysfarven, eller kromaticiteten som den også kaldes, betegnes ved et ubenævnt koordinatsæt (x,y), i et specielt diagram, benævnt kromaticitetsdiagrammet (Se herover). Diagrammet er udviklet af CIE (Den internationale belysningskommision), og viser samtlige farver i den synlige del af spektraet. Enhver farve er repræsenteret ved et koordinatsæt (x,y), ud fra hvilket farvetemperaturen kan beregnes.

### 3.3 Hvide lysdioder

I kategorien hvide lysdioder med max. lysudbytte, fandt jeg frem til følgende fire typer. Det var ikke muligt at finde data nok til at beregne Ra-index og farvetemperatur for de tre bedst egnede. Men det er selvsagt også lysbyttet der er det vigtigste i denne kategori. Som det ses er der et stort spring fra de 44,09 lm/W som Nr. 1 tilsyneladende har, til de 10,93 lm/W som Nr. 4 har. Derfor skal det blive ekstra spændende at få testet dioderne i praksis, for at se om disse beregninger virkelig holder stik.

Nr.	Type	Leverandør	lm/W	Ra	K	O.F.
1	5W4HCA-U	Roithner Laser	44,09	?	?	?
2	LXHL-LW3C	Lumileds	30,90	76	5676	0
3	LLW520120	Dotlight	24,31	?	?	?
4	RLT-WNP1000-02	Roithner Laser	10,93	?	?	?



Grunden til at Nr. 2 (og sikkert også de tre andre) har en optimeringsfaktor (O.F.) på 0, er at Ra-indexet er under 80. Men det skal som sagt ikke tages alt for tunget i denne kategori.

### 3.4 Varmhvide lysdioder

I kategorien hvide lysdioder med max. lyskvalitet (varmhvide lysdioder), fandt jeg frem til følgende fire typer. Her er det udelukkende optimeringsfaktoren som bestemmer hvilke der er bedst egnede. Ra-indexet og farvetemperaturen til nr. 2 og 4 er et et skøn ud fra en vurdering af deres kromaticitets koordinater. Derfor kan det godt afvige en del når de skal testes i praksis.

Nr.	Type	Leverandør	lm/W	Ra	K	O.F.
1	LW W5SG	Osram	22,76	80	6500	113,8
2	YZ-WS5S20	Dotlight	17,97	80	6500	89,89
3	LXHL-MWGC	Lumileds	16,79	93	3236	83,98
4	YZWG3N30N	Dotlight	10,11	80	6500	50,55

### 3.5 Gule lysdioder

I kategorien gule lysdioder med max. lyskvalitet, fandt jeg frem til følgende fire lysdioder. Prototypen med gule lysdioder, konstrueres som et alternativ til lavtryk natrium lamper. Eftersom der stortset kun udsendes gult lys, giver det ingen mening at sammenligne lyskvaliteten på disse dioder. Derfor er det også i denne kategori lysudbyttet der optimeres efter, og som det ses er det væsentligt højere end for de hvide lysdioder. Hvilket også var meningen.

Nr.	Type	Leverandør	lm/W	Ra	K	O.F.
1	LLY53060	Dotlight	101,6	-	-	-
2	RL3-Y4545	Superbrightleds	74,48	-	-	-
3	10Y43-HCA-H	Roithner Laser	60,37	-	-	-
4	RLT-YUP1000-02	Roithner Laser	37,88	-	-	-

## 4 Test af egnede lysdioder

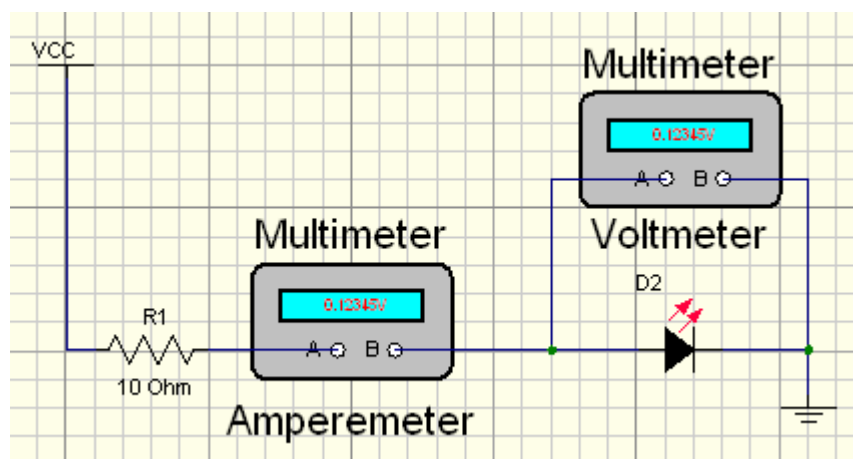
Efter at have udvalgt og hjemkøbt de 12 teoretisk bedst egnede dioder til formålet, skal disse analyseres nærmere for at finde frem til de tre lysdioder som skal indgå i de tre prototyper. Det er netop formålet med denne test-fase, som består af to typer tests; en DC test hvor alle dioderne udsættes for alm. Jævnspænding, og en PWM test hvor de tre udvalgte dioder udsættes for pulsbredde-moduleret strøm.

### 4.1 DC testen

Formålet med DC (jævnstrøms) testen, er dels at teste om de 12 udvalgte lysdioder er så gode som de teoretiske beregninger konkluderede. Men det vigtigste formål med testen er at finde hver enkelt diodes optimale spændingsfald, mht. max. Lysudbytte ( $lm/W$ ). Lysudbyttet for en lysdiode har nemlig en tendens til at falde i takt med at lysintensiteten stiger. Det er dog stadig en balancegang for hvis man skruer helt ned for lysintensiteten på hver enkelt diode for at øge effektiviteten, skal der bare bruges endnu flere dioder for at opnå samme lysstrøm ( $lm$ ). På baggrund af denne test udvælges så een lysdiode fra hver kategori. Disse tre "vinder"-dioder, skal derefter bruges i prototyperne.

#### 4.1.1 Forsøgsopstillingen

Testen foregår ved at lysdioden udsættes for forskellige spændinger over sig i lederetningen. Det udsendte lys fra dioden måles så med et luxmeter, der peger direkte imod dioden. Spændingen leveres af en strømforsyning, og finjusteres med en variabel præcisionsmodstand koblet i serie med dioden. Spændingen over dioden, samt strømmen igennem den, udlæses på to multimeter. Diagram for opstillingen er vist herunder:



Figur 4-1: Diagram for forsøgsopstillingen til DC testen. Luxmeteret er ikke vist.

Luxmetret er monteret på et stativ 12 cm fra lysdioden. Lysdiodene er hver især monteret på en printplade, der nemt monteres på et tilsvarende stativ. Derved tilsluttes de nemt til det andet udstyr via to bananstik. De to stativer

(se billederne herunder), tildækkes af mørklægningsstof under testforløbet, for at undgå indflydelse fra andre lyskilder mest muligt.



Figur 4-2: Forsøgsopstillingen. Fra venstre til højre ses PC til notering af måleresultater i et regneark. Stativ til LED og Luxmeter. Strømforsyning med potentiometer. Amperemeter og voltmeter.



Figur 4-3: Til venstre stativet til luxmetret. Til højre stativet til lysdioden som skal testes. Stativerne er placeret 12 cm fra hinanden, således at dioden lyser direkte ind i luxmeteret. Under forsøgene er stativerne overdækket af mørklægningsstof.

#### 4.1.2 Testprocedure og dataopsamling

Hver af de 12 lysdioder udsættes for spændinger fra den angivne max. værdi, ned til spænding hvor den ikke længere leder nogen strøm. Dette foregår med 0,1 V interval. For hver af disse spændingsniveauer, noteres den resulterende strøm igennem dioden, samt den målte lux-værdi fra luxmetret. Disse data indtastes i regneark.

Regnearket bruges til at omregne lux-værdien til et lysudbytte, for hvert spændingsniveau. Dette lysudbytte skal så, som tidligere omtalt, danne baggrund for udvælgelse af "vinder"-dioderne. Lux-værdien omregnes først til en lysintensitet i cd (candela). Det gøres ved at multiplicere lux-værdien med kvadratet af afstanden (12 cm). Lysintensiteten omregnes derefter til en lysstrøm i lm (lumen). Det gøres ved at multiplicere lysintensiteten med en konstant som er specifik for hver enkelt diode. Konstanten er et udtryk for diodens evne til at spræde lyset, og findes ved hjælp af de regneark som blev brugt til den teoretiske beregning af diodernes lysstrømme ("Hvide Lysdioder.xls" og "Gule Lysdioder.xls"). Ganske enkelt ved at indsætte 1 i feltet for lysintensiteten, og aflæse den resulterende lysstrøm i lumen. Tilslut beregnes lysudbyttet ved at dividere lysstrømmen med den afsatte ohmske-effekt i dioden (spænding \* strøm).

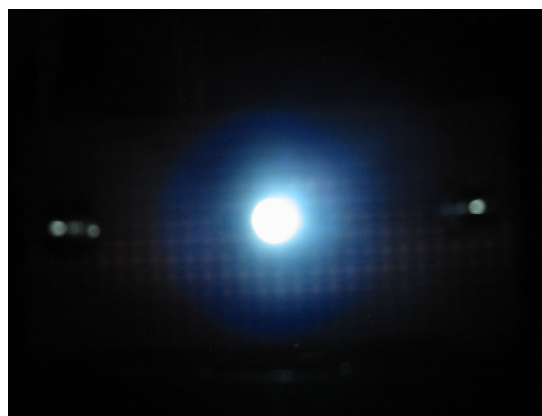
#### 4.1.3 Vinderen i "Varm Hvid"-kategorien

I første omgang sammenlignes kandidat-diodernes lysudbytte på øverste linie (den med max. lysstrøm). Her er det YZ-WS5S20 der vinder med et lysudbytte på 9,32 lm/W. Problemet med denne diode er dog imidlertid at den så kun udsender 0,89 lumen. Hvorved det vil kræve over 1000 lysdioder for at

opnå samme lysstrøm som et traditionelt 60 cm varm hvidt lysstofrør på 1000 lumen, og eftersom de koster ca. 10 kr. stk. bliver det hurtigt alt for kostbart.



Figur 4-4: Typisk varm-hvid lysdiode (YZ-WS5S20)



Figur 4-5: Typisk kold-hvid (alm. Hvid) lysdiode (Osram Golden Dragon)

Den næstbedste kandidat er Osram Golden Dragon, men den viste sig trods navnet ikke at udsende varm hvidt lys! Idet den har en farvetemperatur på 6500 K. Derfor blev den flyttet til "Hvid"-kategorien. Lige efter den ligger Lumileds 1W Warm White med et lysudbytte på 8,1 lm/W ved en max. lysstrøm på 9,36 lumen. Hvilket vil sige at der altså "kun" skal anvendes 100 af disse dioder, for at opnå samme lysstrøm som et traditionelt 60 cm varm hvidt lysstofrør på 1000 lumen. Hvis de drives af DC, sikkert en del færre hvis der anvendes PWM. Derved blev vinderen af "Varm Hvid"-kategorien: Lumileds 1W Warm White.

#### 4.1.4 Vinderen i "Hvid"-kategorien

I første omgang sammenlignes kandidat-diodernes lysudbytte på øverste linie (den med max. lysstrøm). Her var der store forventninger til Lumileds 3 W diode. Problemet med den var dog at den ikke kunne komme op på den specificerede max. Strøm (1 A) igennem sig. Den slukkede/brød ned allerede når den kom over 800 mA. Det skyldes højst sandsynligt manglende køling, trods den obligatoriske aluminiumskøleplade ("star"), var det åbenbart ikke nok. Hvilket er bekymrende når dioderne skal bygges ind i et plastikrør. Dioden var selv ved 800 mA den kraftigste diode, med en lysstrøm på 47,33 lm. Trods denne høje lysstrøm, havde den dog ikke det bedste lysudbytte, kun 16,43 lm/W.

Det bedste lysudbytte blev derimod leveret af 5W4HCA-U, med 60 lm/W, og en lysstrøm på 3,60 lm. For at afgive samme lysstrøm som et traditionelt hvidt lysstofrør på 1150 lumen, skal der altså anvendes ca. 320 af disse dioder. Det er ganske vist mange, men det burde være muligt at få dem samlet i et 60 cm rør. Derfor må det konkluderes at 5W4HCA-U er vinderen i denne kategori.

#### **4.1.5 Vinderen i "Gul"-kategorien**

Igen sammenlignes kandidat-diodernes lysudbytte på øverste linie (den med max. lysstrøm). Her er det uden tvivl LLY53060 som har det bedste lysudbytte, på 86,66 lm/W ved en lysstrøm på 6,98 lm. Eftersom det er en rimelig stor lysstrøm som udsendes fra hver diode (ca. dobbelt så meget som dioden der skal anvendes i den hvide-prototype), kan man godt tillade sig at kigge på anden linie i regnearket. Her er lysudbyttet væsentligt større: 99,40 lm/W, men lysstrømmen til gengæld en smule mindre (5,25 lm). Ved at vælge denne diode kan man altså konstruere en prototype bestående af ca. 220 lysdioder, med et lysudbytte på næsten 100 lm/W. Derfor må det konkluderes at LLY53060 er vinderen i denne kategori.

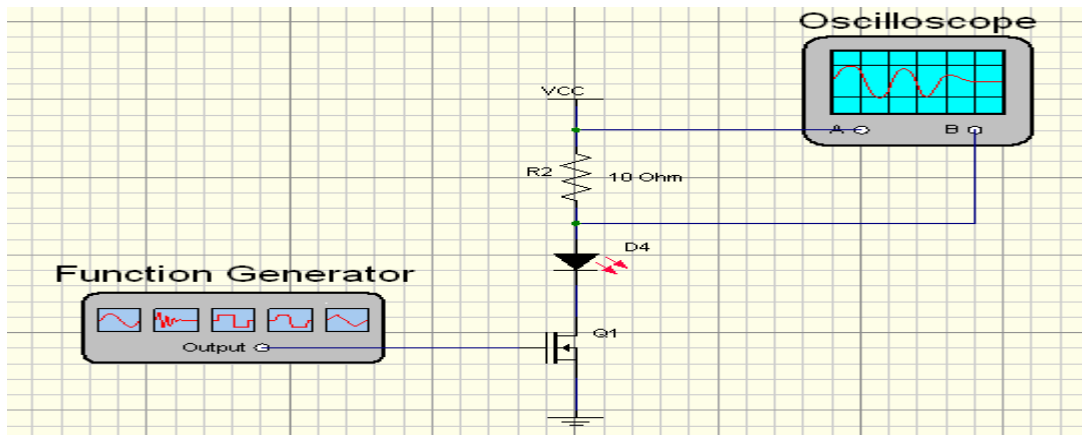
#### **4.2 PWM testen**

Efter sigende skulle en lysdiodes lysintensitet kunne øges markant, ved anvendelse af såkaldt pulsbredde-modulation, eller PWM (Pulse Width Modulation) på engelsk. Denne teknik går kort fortalt ud på at tænde og slukke lysdioden kontinuerligt meget hurtigt. Typisk 100 til 10.000 gange i sekundet. Imens lysdioden er tændt får den så lov til at trække meget mere strøm end tilladt ved alm. DC drift. Den ekstra store strøm får så lysdioden til at lyse endnu kraftigere end muligt ved DC drift, men ganske vist kun i den korte periode hvor den er tændt. Fordelen ved PWM er imidlertid at det menneskelige øje ikke kan nå at opfatte at dioden tændes og slukkes. Det registrerer kun det kraftigste lysniveau. Derved kan øjet snydes til at tro at der udsendes mere lys end der egentlig gør, hvorved det faktiske lysudbytte også forøges markant. Efter sigende op til ca. 25 %. Yderligere har hvide lysdioder den fordel at deres fosfor-lag kan virke selvlysende og derfor bidrager til at holde lyset lidt længere tid. Det kan også være med til at øge det samlede lysudbytte.

Der er mange meninger om fordelene ved PWM til forøgelse af lysudbyttet, både for og imod. Det er sikkert også meget afhængigt af hvilken diode det anvendes på. Formålet med denne test er netop at se om det kan betale sig at anvende PWM i prototyperne, afhængigt af hvor meget bedre lysudbyttet egentlig bliver. For at begrænse testens omfang, udføres den kun på de tre lysdioder som allerede, ud fra DC testen, er udvalgt til at indgå i prototyperne.

##### **4.2.1 Forsøgsopstillingen**

I PWM testen, er lysdioden og luxmeteret monteret i stativer på samme måde som i DC testen. Således at der er 12 cm imellem dioden og luxmeteret. Den eneste forskel på de to testtyper er altså den elektriske forbindelse af lysdioden (se diagrammet herunder). Dioden er ligesom før koblet i serie med en modstand, men denne gang er der også indskudt en Power MOSFET transistor i serie. Den skal sørge for tænde og slukke for strømmen igennem dioden, med det ønskede PWM signal. PWM signalet leveres af en funktionsgenerator, hvis TTL output direkte styrer MOSFET transistoren.

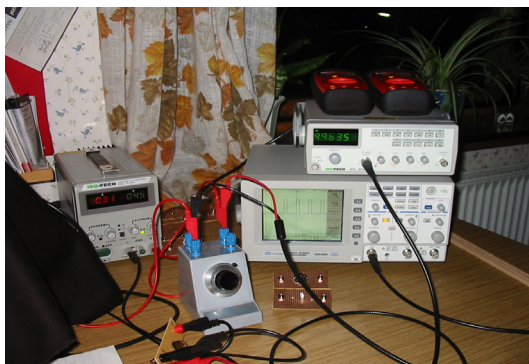


Figur 4-6: Digram for forsøgsopstillingen til PWM testen. Luxmeteret er ikke vist.

Power MOSFET transistoren er af typen MTP3055V fra On Semiconductor, som typisk anvendes i switch-mode strømforsyninger. For at overvåge den pulsbrede modulerede strøm som sendes igennem dioden, er der tilsluttet et oscilloskop over modstanden. Oscilloskopet kan udover at vise PWM signalet, måle peak spændingen, og derved også peak strømmen, samt signalets duty-cycle.

#### 4.2.2 Testprocedure og dataopsamling

I modsætning til DC testen, hvor der kun var en variabel parameter: spændingen, er der i PWM testen hele tre variable: peak strøm, duty cycle og frekvens. Testen begrænses således at følgende duty cycle værdier afprøves: 20%, 25%, 33%, 50%, 66%, 75% og 80%. Der afprøves 10 forskellige peak strømme, gående fra 0 og op til fem gange den specificerede max. strøm ved kontinuerlig DC drift. Frekvensen burde i teorien ikke have den store betydning for effektiviteten af PWM-signalet, den skal blot min. være på 100 Hz for at undgå flimrer for øjet. Her testes i første omgang med to forskellige frekvenser: 100 Hz og 1 KHz. Der blev dog kun afprøvet to frekvenser på de to første dioder, da resultatet tilsyneladende var uafhængigt af frekvensen. Herefter anvendes kun en frekvens på 100 Hz.



Figur 4-7: Formodstand, Power MOSFET'en, funktionsgeneratoren til at genererer PWM signalet, og oscilloskopet til at måle duty-cycle og spænding.



Figur 4-8: Den samlede testopstilling til PWM-test af lysdioderne. Til venstre "mørkekammeret", til højre det elektriske udstyr.

Testresultaterne er organiseret i et regneark for hver diode ("Lumileds 1W Warm White - PWM Test.xls", "LYW520110 - PWM Test.xls", "LLY53060 - PWM Test.xls" og "5W4HCA-U - PWM Test.xls"). Således hver frekvens har sin egen sheet. Lux-værdierne for de enkelte Peak strøm og duty cycle, indskrives i en tabel. Udfra denne Lux-værdi tabel beregnes en lysstrøm tabel, udfra den Lux til Lumen faktor som blev anvendt i DC testen af dioden. Udfra lysstrøm tabellen beregnes så tilslut en tabel med lysudbyttet for hvor enkelt kombination af duty cycle og peak strøm. Lysudbyttet (lm/W) beregnes ved at dividere lysstrømmen med den afsatte ohmske effekt i dioden ( $V \cdot I \cdot \text{duty cycle}$ ). Lysudbyttet kan så sammenlignes med det som blev fundet i DC testen.

#### 4.2.3 PWM testkonklusion

Tabellen herunder viser de maksimale opnåelige lysudbytteværdier for de fire dioder som gennemgik en PWM-test, for henholdsvis DC- og PWM-testen. Som det ses er der tilsyneladende slet ingen energibesparelse at hente ved at anvende PWM, idet almindelig DC drift åbenbart er mere effektiv. For slet ikke at nævne at DC drift selvfølgelig også er en smule enklere og derved billigere.

LED	Max. lm/W i DC-test	Max. lm/W i PWM-test
Lumileds 1W Warm W.	16,28	13,61
LYW520110	16,11	12,14
LLY53060	120,74	72,76
5W4HCA-U	84,06	59,24

En forklaring på at PWM-modulationen ikke viser den åbenlyse forbedring som var forventet, kan evt. skyldes at lyset "ses" med et luxmeter og ikke et menneskeligt øje. Fordelen med PWM skulle jo netop være at det "snyder" øjet til at tro der hele tiden er den stærke lysstyrke, som i virkeligheden kun udsendes i meget kort tid af gangen. Lux-meteret er måske ikke lige så let at snyde, eftersom det konstant midler måleresulterne for de seneste 2 sekunder. Jeg må dog alligevel stole på Lux-meteret, da det ikke er muligt at give en nogenlunde præcis vurdering af lysstyrken med det blotte øje.

Derfor må jeg konkludere at PWM ikke bør anvendes i de kommende prototyper, almindelig DC-drift skulle tilsyneladende give den bedste effektivitet. Dermed dog ikke sagt at PWM ikke kan bruges til noget. Det er stadig den mest energieffektive måde til f.eks. lysdæmpning, hvis det på et senere tidspunkt skulle implementeres i en prototype. Lyset kan ganske enkelt reguleres ved at regulere duty cyclen, hvorved næsten ingen effekt går til spilde. Hvis der bare blev indsat en variabel modstand foran lysdioderne, ville der gå en masse effekt til spilde i den.

## 5 Design af prototyperne

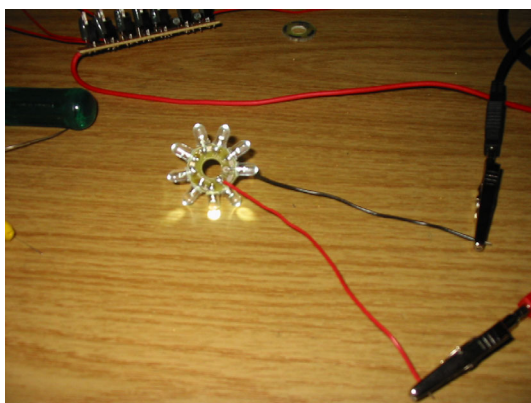
Som tidligere omtalt, skal der udvikles tre prototyper: den hvide prototype, den varm-hvide prototype, og den gule prototype. De er hver især opkaldt efter den lysfarve de udsender, og har alle det til fælles at de skal virke som en direkte erstatning for et T8 60 cm lysstofrør. Det var oprindeligt planen at der for hver prototype, først skulle bygges en 1. prototype, og på baggrund af erfaringerne fra den, en 2. og fuldt funktionsdygtig prototype. Det er imidlertid kun den varm-hvide som blev udviklet på denne måde. De to andre blev derimod udelukkende konstrueret som funktionsdygtige prototyper (2. prototype). Designet af de enkelte prototyper er beskrevet i de følgende afsnit.

### 5.1 Den hvide prototype

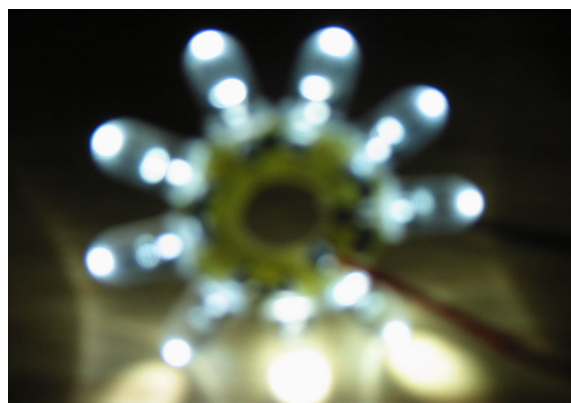
Denne prototype skal som tidligere nævnt anvende lysdioder af typen 5W4HCA-U, fra Roithner, og ialt leverer en lysstrøm på 1150 lm. I følge beregningerne udsender hver lysdiode ca. 3,6 lm, derfor skal der bruges min. 320 stk. til prototypen. I denne prototype er første prototype sprunget over, fordi der inden påbegyndt konstruktion, blev vist stor interesse fra Schott Termofrost, og det var derfor vigtigt at få prototypen færdig hurtigst muligt.

#### 5.1.1 Radialplanerne

Lysdioderne organiseres i grupper, såkaldte radialplaner, som hver især sørger for en omnidirektional lysudstråling. Da hver enkelt lysdiode kun har en lysspredning på 20 grader, vil det kræve  $360/20=18$  lysdioder at lave en omnidirektional udstråling. Vel og mærket hvis alle dioder er placeret i centrum. Eftersom hver diode har en diameter på 5 mm, ville det give radialplanet en omkreds på  $18*5=90$  mm, og dermed en diameter, som er markant større end de 26 mm et T8 lysstofrør måler i diameter. For at mindske denne diameter vælges det i stedet at lave mindre, men flere, radialplaner, med færre dioder.



Figur 5-1: Radialplan til den hvide prototype i dagslys

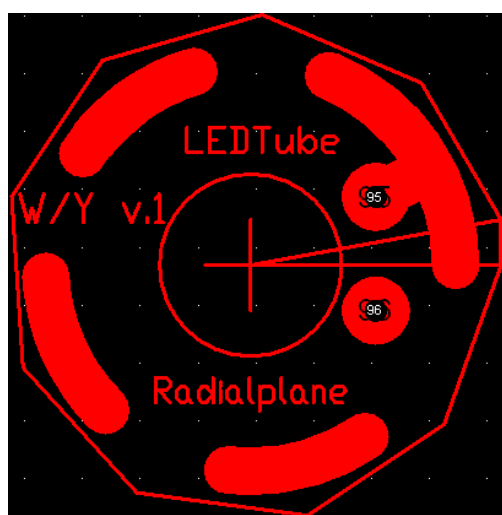


Figur 5-2: Radialplan til den hvide prototype i mørke

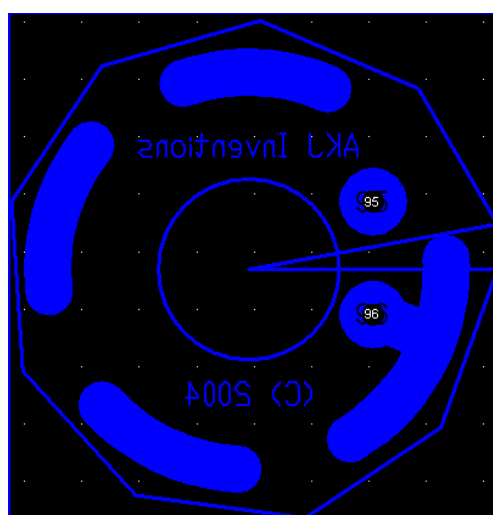


For at forbedre den ensartede lysspredning, roteres radialplanerne, i forhold til hinanden, langs rørets længde. Det skulle også gerne kompensere en smule for de "skygge vinkler" som opnås ved brug af de mindre radialplaner. For at undgå at skulle lave og montere flere forskellige radialplaner, med forskellig rotation, ønskes et hvor rotationen kan ændres ved blot at vende radialplanet. Ideen er at radialplanerne skal side vinkelret på en fælles printplade (Radialplangruppe modul, beskrives i næste afsnit). Radialplanerne sidder fast i passende sprækker på Radialplangruppen. Afhængigt af fra hvilken side radialplanet monteres på Radialplangruppen, ændres dennes rotation af lysdioderne.

Løsningen er at konstruere radialplanet som et polygon med et ulige antal sider hvorpå lysdioderne monteres, samt en sprække, til montering på Radialplangruppen. Det bevirker at lysdioderne lyser i forskellige retninger. For at undgå at prototypens diameter bliver meget større end et lysstofrør, vælges et radialplan med 9 lysdioder. Radialplanerne opbygges af printplader som det ses herunder. Eftersom hver lysdiode skal have 3,0 V over sig for at levere de 3,6 lm, skal et radialplan altså have  $3 \cdot 9 = 27$  V over sig, og kommer derved til at levere  $9 \cdot 3,6 = 32,4$  lm pr. stk.



Figur 5-3: Printudlæg for toplaget til et radialplan



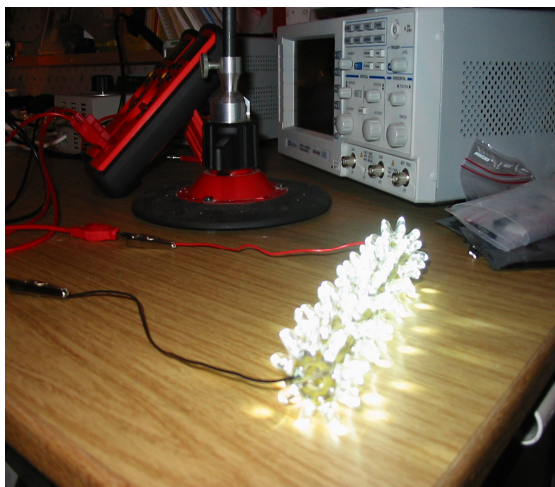
Figur 5-4: Printudlæg for bundlaget til et radialplan

For at få min. 320 lysdioder, skal der altså bruges  $320/9 = 35,5 \approx 36$  radialplaner ialt. Ved at opbygge radialplanerne som printplader, kan de nemt massefremstilles, og der laves rigeligt ud over de 36, som skal bruges til denne prototype. Således at der evt. også er til den gule prototype.

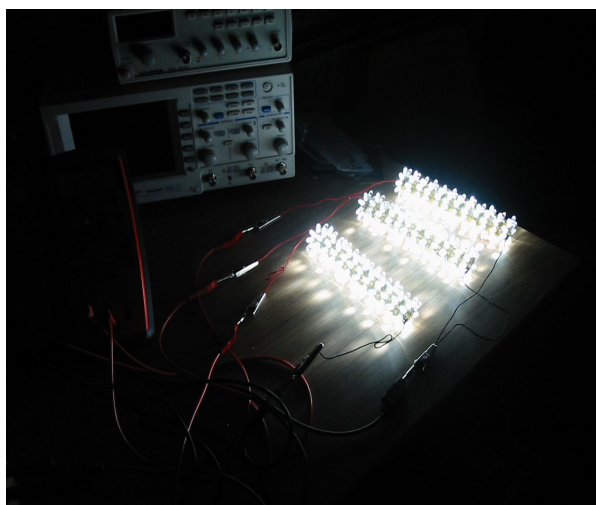
### 5.1.2 Radialplangrupperne

Prototypen indeholder så mange lysdioder at det er muligt at sætte dem direkte i serie, og forsyne dem med ensrettet netspænding ( $230 \cdot \sqrt{2} = 325$  V). Da hver radialplan skal have et spændingsfald på 27 V over sig, og der ialt er 36 radialplaner, er der behov for tre parallelle serieforbindelser ( $36/(324/27) = 3$ ). I hver serieforbindelser skal der så side 12 radialplaner, med

ialt 108 lysdioder. Se også diagrammet i appendix. For hver af disse serieforbindelser skal der indskydes en strømbegrænser.

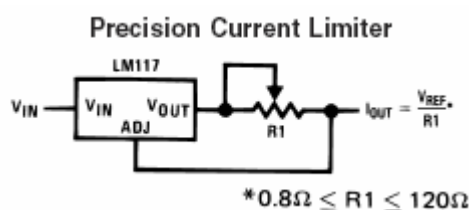


Figur 5-5: En Radialplangruppe



Figur 5-6: Alle tre radialplangrupper liggende side om side

Lysdioder har en max. gennemgangsstrøm ( $I_{f,max}$ ) som de ikke må overskride. Hvis det sker brænder de ganske simpelt af, efter kort tid. Strømmen igennem en diode er ikke kun afhængig af spændingen over den, men også af diodens temperatur. Jo længere en diode har ledt strøm, desto varmere bliver den, og får derfor en bedre ledningsevne. Dvs. der skal mindre spænding over den, for at den leder samme strøm, som da den var kold. Det hjælper altså ikke bare at påtrykke serieforbindelsen, af lysdioder, med en konstant spænding. Spændingen skal reguleres afhængig af den strøm dioderne trækker, således at  $I_{f,max}$  ikke overskrides. Det er strømbegrænserens opgave.



Figur 5-7: Simple strømbegrænser opbygget af LM117/LM317 variabel spændingsregulator og feed-back modstand

Strømbegrænseren opbygges med en variabel spændingsregulator af typen LM317, koblet som en strømbegrænser med en feed-back modstand, som vist herover. Eftersom hver lysdiode, og derved en serieforbindelse, max. kan tåle 20 mA igennem sig, kan feed-back modstanden beregnes med følgende formel:

$$I_f = \frac{V_{REF}}{R} \Rightarrow R = \frac{V_{REF}}{I_f} = \frac{1,25}{0,02} = \underline{62,5\Omega}$$

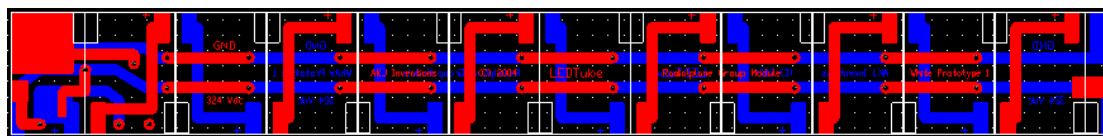
Hvor  $V_{REF}$  er regulatorens referencespænding, givet i databladet til 1,25 V. Eftersom 62,5 Ohm ikke findes blandt standardmodstandene, vælges nærmeste tilgængelige over 62,5, hvilket er 68 Ohm. Derved begrænses strømmen til:

$$I_f = \frac{V_{REF}}{R} = \frac{1,25}{68} = \underline{18,38mA}$$

Det er selvfølgelig lidt mindre end de ønskede 20 mA, men dog stadig tæt på. Strømbegrænseren regulerer spændingen over dioderne i området fra  $325 - V_{dd, min}$  ned til  $325 - V_{dd, max}$ .  $V_{dd, min}$  er minimum spændingsfald over LM317, også kaldet min. drop-down spændingen, den spænding der min. skal være over regulatoren, for at den kan fungere.  $V_{dd, max}$  er tilsvarende max. spændingen over kredsen. For at minimere effekttabet i strømbegrænseren, vælges en LM317 version med en så lav  $V_{dd, min}$  som muligt. LM317S har en  $V_{dd, min}$  på 1,25, og er umiddelbart bedste bud. Se evt. uddrag fra datablad i appendix. Med en feed-back modstand på 68 ohm, er det samlede spændingsfald over strømbegrænseren minimum:

$$V_{sb, min} = V_{dd, min} + R \cdot I_{f, max} = 1,25 + 68 \cdot 0,02 = \underline{2,61V}$$

Hvis det antages at Radialplangrupperne forsynes med en perfekt jævnspænding på 325 VDC, vil serieforbindelsen altså maximum blive forsynet med  $325 - 2,61 = 322,39$  V. Svarende til  $322,39 / 12 = 26,87$  V pr. radialplan. Det må siges at være tilpas tæt på de 27 V som de skulle forsynes med.



Figur 5-8: Printudlæg for en Radialplangruppe til den hvide prototype. Rød er toplaget, blå er bundlaget. De hvide firkanter markerer "hakkerne" til radialplanerne.

Hver af de tre Radialplangrupper konstrueres på ensartede printplader, som illustreret herover. På printpladen monteres de to komponenter til strømbegrænseren, samt de 12 radialplaner. For hver radialplan findes et tilsvarende "hak", skiftevis på den ene og den anden side. Således at radialplanerne, som tidligere nævnt, er roteret i forhold til nabo radialplanet.

### 5.1.3 Ensretning af netspændingen

For at netspændingen kan bruges af LED modulerne, skal den først ensrettes og udglattes. Til det anvendes en ensretterbro (rectifier) og en kondensator. Som ensretterbro anvendes en af typen DF04M, hvis vigtigste parameter er at den kan klare 400 V. Kondensatoren sørger for at udglatte outputtet fra ensretterbroen, til jævnspænding (DC). Outputtet efter kondensatoren er dog ikke helt perfekt. Spændingen varierer med en værdi kaldet rippelspændingen  $V_r$ , som er afhængig af kondensatorens kapacitet. Det optimale ville

selvfølgelig være en rippelspænding på 0 V, men som det ses på formelen herunder vil det kræve en urimelig stor kondensator.

$$C = \frac{I_L \cdot T}{V_r}$$

Hvor  $I_L$  er den samlede strøm som trækkes fra de tre Radialplangrupper.  $T$  er periodetiden for den "halv-sinus formede" spænding der kommer ud fra ensretterbroen, med en frekvens på 100 Hz. Eftersom der skal bruges en kondensator som kan klare min. 325 V, er en elektrolyt kondensator yderligere stor. Ved designet tages derfor udgangspunkt i kondensatorens fysiske størrelse, idet der ønskes en så lille rippelspænding som muligt. Der vælges derfor en kondensator, hvis diameter passer til rørets indvendige diameter, og ikke er alt for høj/lang. Den største umiddelbart tilgængelige kondensator med disse dimensioner var en på 330 uF og max. spænding på 400 V. Derved fås en rippelspænding på:

$$C = \frac{I_L \cdot T}{V_r} \Rightarrow V_r = \frac{I_L \cdot T}{C} = \frac{3 \cdot 0,018 \cdot 0,01}{330 \cdot 10^{-6}} = \underline{1,64V}$$

Den reelle jævnspænding kommer altså til at ligge imellem 325-1,64 = 323,36 VDC og 325 VDC. Hvilke må forventes at bidrage til et mindre lysudbytte.

#### 5.1.4 Indbygning i rør

De tre Radialplaner og ensrettermodulet, skal indbygges i forlængelse af hinanden i et plexiglasrør på 590 mm (svarende til et lysstofrør excl. stikkene i enderne). I begge ender monteres endestykker med stik, af samme dimensioner som dem på et T8 lysstofrør. Alle modulerne lodes sammen ved de elektriske forbindelser, derudover limes de med varmelim, for yderligere mekanisk stabilitet. Endestykkerne er af bearbejdet plastik, hvori der er monteret 2 stk. standard 2 mm stik med 12 mm mellemrum, i overensstemmelse med T8 standarden.

Plexiglasrøret er med sin ydre diameter på 50 mm, væsentligt tykkere end et T8 lysstofrør (på 26 mm), men passer dog stadig i de fleste armaturer. Størrelsen skyldes at der er valgt et standard plexiglasrør, med en indre diameter på 40 mm. Der er lidt ulemper ved sådan et rør, dels dets størrelse og vægt, men derudover også at de tykke plexiglassider reflekterer en del lys, som derfor ikke slipper ud af røret. Hvilket nedsætter det samlede lysudbytte. Rent optisk set ville prototypen nok være bedre tjent uden plexiglas indkapslingen. Men som prototypen er konstrueret nu, er det nødvendigt for at holde det hele sammen.

#### 5.1.5 Test og fremvisning

De første test af prototypen med alle tre Radialplangrupper tilsluttet, ser umiddelbart ud til at have samme styrke som et lysstofrør. Dog stadig med den ulempe at den selvfølgelig udsender punktformet lys, imod lysstofrørets kontinuerlige lys. Efter at have indsat prototypen i plexiglasrøret, fremhæves det

punktformedelys yderlige, og det skyldes nok, som tidligere nævnt, at plexiglasrøret reflekterer en del af lyset. Luxmeteret kan umiddelbart ikke give et ordenligt svar, mht. om lysstrømmen er på højde med et lysstofrør. Det vil kræve et utal af målinger, fordi udstrålingen ikke er kontinuert, og derfor giver forskellige resultater, afhængigt af måleretningen.



Figur 5-9: Prototypen uden plexiglasrøret. Forsynet direkte med 230 VAC.



Figur 5-10: Den færdige prototype inde i plexiglasrøret, monteret i et armatur.

Ved at tilslutte en energimåler, kunne det ses at prototypen brugte ca. 18 W, hvilket er det samme som et lysstofrør af samme størrelse. Der er altså ikke nogle energisparefordele at hente endnu, men det vil uden tvivl komme efterhånden som lysdioderne bliver mere og mere effektive.

Prototypen blev som sagt efter opfordring demonstreret for Schott Termofrost. Først hos salgsafdelingen i Lyngby, og derefter på et udviklingsmøde på hovedkontoret i Stockholm. Indtrykket var at den ikke udsendte samme lysmængde som et lysstofrør. Det blev testet ved at sætte den ind i et mørkt rum, og iagttagelse dens evne til at oplyse rummet, sammenlignet med et lysstofrør. Prototypen lyste ikke vægene op med samme styrke, som lysstofrøret, men var til gengæld skarpere hvis man kiggede direkte ind i en lysdiode. Det skal dog blive spændende hvad testen hos Delta konkluderer, om prototypen reelt lyser mindre, eller der blot er tale om synsbedrag pga. manglende kontinuitet i lysstrømmen.

Schoot Termofrost konkluderede at de stadig syntes idéen var god til deres kølerumsdøre, men at de gerne ville have mere lys ud. På baggrund af dette ønske, tilbød jeg også at demonstrere den varm-hvide prototype, og samtidig tilpasse denne efter Schott Termofrosts idéer og ønsker.

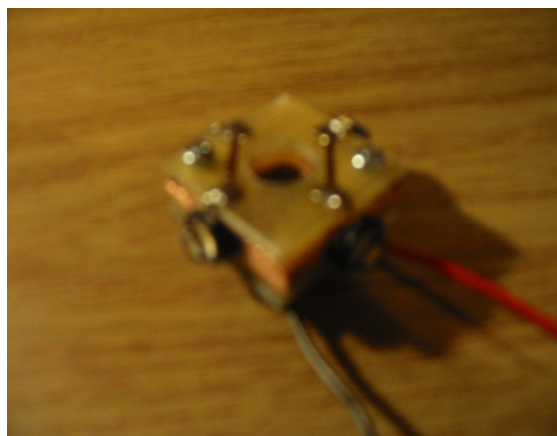
## 5.2 Den varm-hvide prototype

Denne prototype skal som tidligere nævnt anvende lysdioder af typen Luxeon 1W Warm White, og ialt leverer en lysstrøm på min. 1150 lm. I følge lysdiodens datablad leverer den 20 lm, derfor skal der bruges min. 56 stk. til prototypen. Der udvikles først en 1. prototype, hvor lysdioderne er monteret på en træpind, og forsynes med strøm fra en ekstern strømforsyning. Derefter

en 2. prototype, hvor det hele inklusiv strømforsyningen, er indbygget i et rør. Prototyperne er yderligere beskrevet i de følgende afsnit.

### 5.2.1 Første prototype

Indledningsvis konstrueres en første prototype, hvor lysdioderne monteres på en træpind. Således at de udsender lyset omnidirektionalt på samme måde som et lysstofrør. Lysdioderne er organiseret i grupper, i form af såkaldte radialplaner, som hverisær sørger for en omnidirektional lysspredning. Eftersom hver lysdiode har en spredning på 110 grader, skal der fire til for at lyse hele vejen rundt (360 grader). Ligesom alle andre lysdioder skal strømmen igennem dem begrænses, i dette tilfælde til 350 mA. Derfor findes der for hver serieforbindelse en strømbegrænsner. Serieforbindelserne strømforsynes fra en laboratoriestrømforsyning. Diagrammet for konstruktionen findes i appendix.

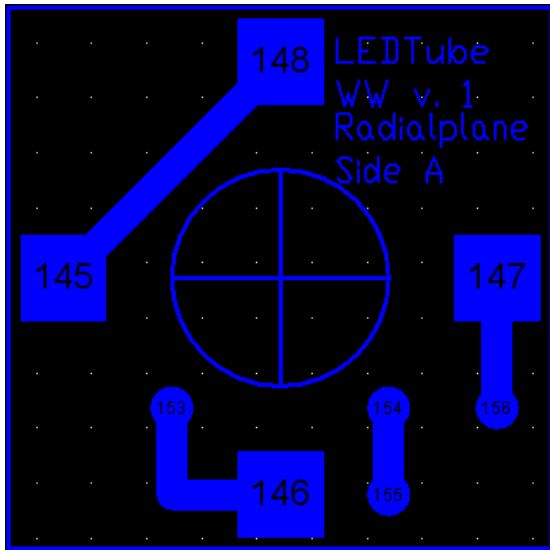


Figur 5-11: Radialplanet bestående af en kobberplade og to printplader i en "sandwich". Lysdioderne er monteret på de fire sider.

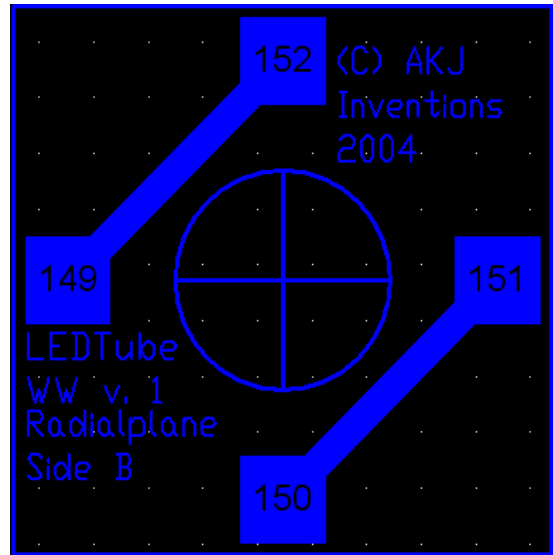


Figur 5-12: Lysudbyttet fra et radialplan. Som det ses dannes der fire "skyggevinkler" imellem lysdioderne.

Hvert radialplan består af fire lysdioder som er serieforbundet. Eftersom hver lysdiode skal have 3 V over sig, for at levere den ønskede lystrøm, skal hvert radialplan have 12 V over sig. Radialplanet er kvadratisk og har en lysdiode monteret på hver side. Derudover er der et 8 mm hul i midten, så det kan monteres på træpinden. Luxeon lysdioderne udskiller sig fra de fleste andre fordi de er meget kraftigere, men til gengæld bliver de også meget varme, og kræver køling. Dette problem er løst ved at konstruere radialplanet som en sandwich, bestående af to enkelt-sidede printplader og en 3 mm tyk kobberplade. Lysdioderne monteres på siden af sandwichen, således at deres bagplade rører kobberpladen. Anoden og katoden lodes på hver sin printplade, som sidder på hver sin side af kobberpladen. Imellem kobberpladen og printpladerne findes små mellemrum, således at kobberpladen kan komme af med varmen. Dette rum fastholdes af to maskinskruer. Printudlæg for de to printplader er vist herunder:

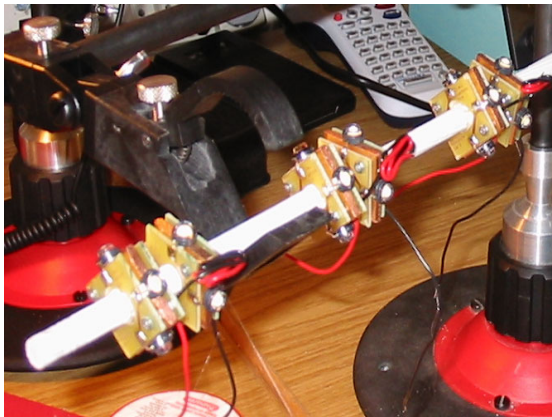


Figur 5-13: Printudlæg for den ene side af radialplan "sandwich".



Figur 5-14: Printudlæg for den anden side af radialplan "sandwich".

For at minimere antallet af serieforbindelser, og dermed antallet af nødvendige strømbegrænsere, ønskes så mange som muligt af radialplanerne at være serieforbundet. Laboratoriestrømforsyningen kan max. levere 30 V, og eftersom hver radialplan skal have 12 V, kan der kun være 2 radialplaner ( $2 \cdot 12 = 24$  V) i hver serieforbindelse. Derfor kræver det 7 serieforbindelser til de ialt 14 radialplaner, med tilsammen 56 lysdioder. Radialplanerne monteret på træpinden ses herunder. Som det ses er hver anden radialplan roteret 45 grader, for at give en mere ensartet lysspredning.



Figur 5-15: Radialplanerne monteret på træpind. Bemærk den 45 graders rotation af radialplanerne i pindens retning.



Figur 5-16: 1. Prototype med lysende lysdioder. I forgrunden ses de syv strømbegrænsere monteret på Veroboard.

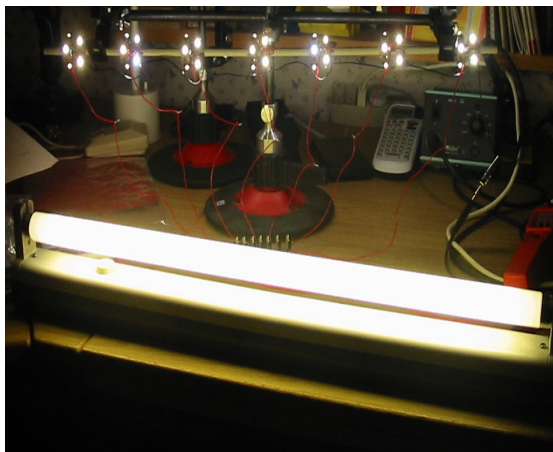
Med syv serieforbindelser, kræves altså syv strømbegrænsere. Hver strømbegrænser er opbygget af en LM317 variabel spændingsregulator, og en feed-back modstand. Koblet således at det virker som en simpel strømbegrænser. Max. strømmen igennem strømbegrænsere bestemmes af feed-back modstanden, ud fra følgende formel:

$$I_f = \frac{V_{REF}}{R} \Rightarrow R = \frac{V_{REF}}{I_f} = \frac{1,25}{0,35} = 3,57\Omega$$

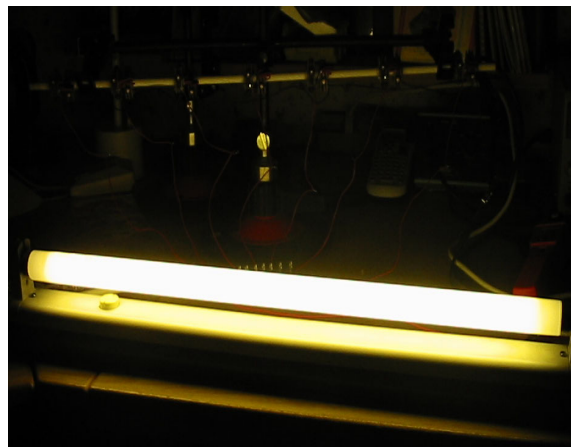
Da max. strømmen igennem lysdioderne er på 350 mA, giver det en modstand på 3,57 ohm. Eftersom denne værdi ikke findes som standard, udvælges den nærmeste som ligger over denne værdi (for ikke at overskride de 350 mA). Derfor sættes R=3,9 ohm, hvilket reelt giver følgende strømbegrænsning:.

$$I_f = \frac{V_{REF}}{R} = \frac{1,25}{3,9} = 321mA$$

Det er en del under de 350 mA. Derfor må det forventes at lysudbyttet bliver lidt mindre end først antaget.



Figur 5-17: 1. Varm-Hvide prototype i baggrunden, et tilsvarende lysstofrør i forgrunden. Det ser ud som om lystofrøret giver mere lys end prototypen.



Figur 5-18: Når prototypen slukkes, bemærkes alligevel det manglende belysningsbidrag på omgivelserne.

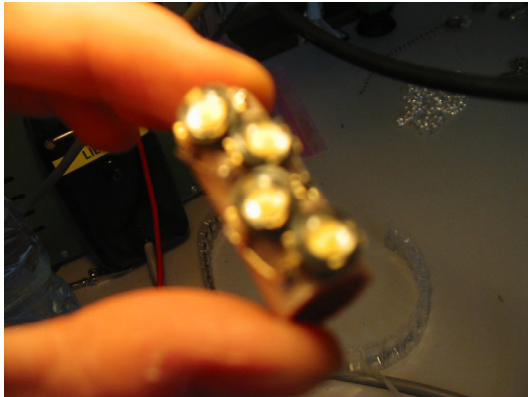
Som det ses på billedet herover lyser prototypen ganske kraftigt op. Det virker dog umiddelbart ikke lige så kraftigt som lysstofrøret. Hvilket nok primært skyldes at prototypen udsender punktformet lys, hvor lysstofrøret udsender kontinuert lys. I teorien skulle prototypen udsende  $56 \cdot 20 = 1120$  lm, imod lysstofrørets 1100 lm, så problemet burde ligge i distribueringen af lyset. Ved at koncentrere lysdioderne mere, må man formode at problemet kan mindskes. Det skal blive spændende at få testet lysudbyttet professionelt, for at se om der udsendes mindre lys, eller der blot er tale om synsbedrag.

### 5.2.2 Anden prototype og de nye radialplaner

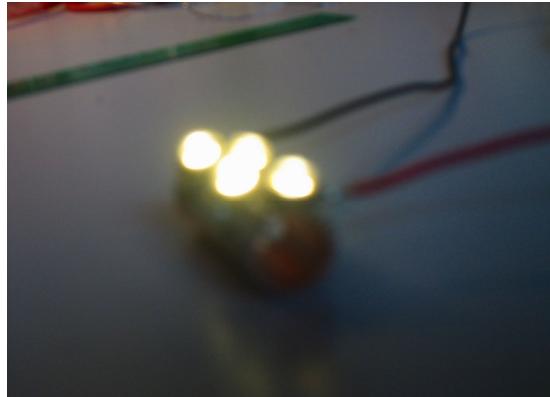
Anden prototype skal være et komplet rør til erstatning af et tilsvarende lysstofrør, og kunne testes professionelt på samme måde som lysstofrør. Derudover skal det selvfølgelig helst indebære en række forbedringer i forhold til første prototype. Denne prototype udskiller sig desuden, fordi Schott Termofrost også har vist interesse for at se den, evt. med henblik på



investeringer i videreudviklingen af projektet. Grunden til at de også har interesse i den varm-hvide, er at de skønnede at den hvide prototype udsendte for lidt lys, sammenlignet med et lysstofrør. Derfor tilbød jeg også at fremvise den varm-hvide prototype, som anvender langt kraftigere lysdioder. Den anden prototype bærer derfor også præg af specifikke ønsker og feedback fra Schott Termofrost. Så som f.eks. begrænset udstråling (180 grader), tættere pakning af lysdioderne, samt et tyndere rør. Der blev aftalt en presentation af 2. prototype, for Schott Termofrost, den 17/1-2005. Det er derfor denne dato, som er deadline for prototypen.



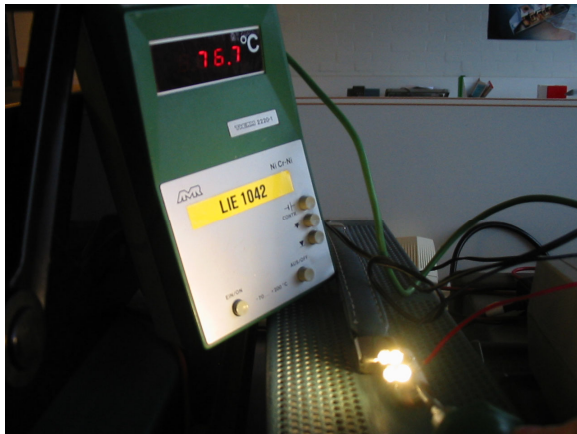
Figur 5-19: Det nye radialplan (lysdiodegruppe) til Den varm hvide prototype. De 4 lysdioder er monteret på et kobberør, vha. noget dobbeltklæbende termisk tape.



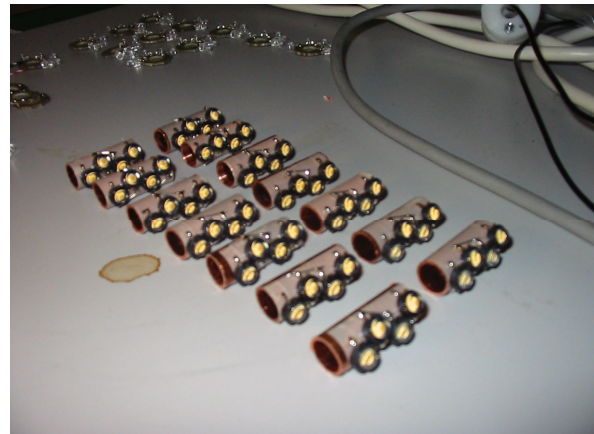
Figur 5-20: Lys fra radialplanet når det forsynes med 12 VDC, og trækker ca. 350 mA.

Det var oprindeligt tanken at radialplanerne fra første prototype også kunne anvendes i anden prototype. Men ønsket om en begrænset udstråling og mindre størrelser, har gjort det nødvendigt at konstruere nye. Ligesom de tidligere radialplaner består hver især af fire serieforbundne lysdioder. Det mekaniske design er dog fuldkommet anderledes. De nye radialplaner består ganske enkelt af et kobberør, hvor på lysdioderne er monteret som tangenter. Lysdioderne er monteret på kobberøret med noget specielt termotape, som leder varmen ind til røret, men samtidig virker som elektrisk isolator. Således at lysdiodernes terminaler ikke er forbundet til kobberøret.

På radialplanet sidder de fire lysdioder helt tæt, og hver anden er roteret ca. 30 grader i forhold til naboen, for at forbedre lysspredningen. Lysdioderne er forbundet i serie med små stykker ståltråd, som er klistret fast på termotapen, og derefter loddet på terminalerne. Ligesom radialplanet fra 1. prototype, kræver det nye radialplan ca.  $3 \times 4 = 12$  V over sig for at afgive ialt  $20 \times 4 = 80$  lm.



Figur 5-21: Efter et stykke tid med tændte lysdioder, holder kobberøret en temperatur på ca. 76,7 C. Det er højt, men dog stadig acceptabelt.



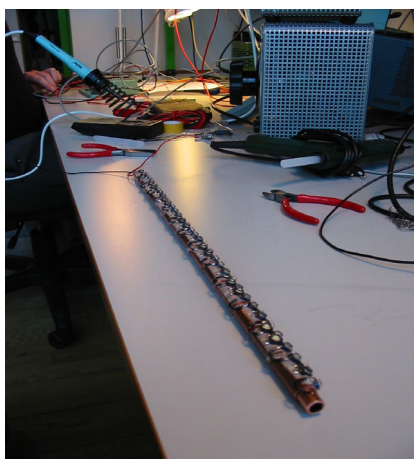
Figur 5-22: Der blev ialt konstrueret 14 af de omtalte radialplaner, til den varm hvide prototype.

Det nye radialplan afgiver, ligesom det gamle, meget varme. Som det ses på billedet herover, nåede kobberørets temperatur, efter ca. en halv times drift, op på 76,7 °C. Det er ganske vist meget, men stadig en del under den specificerede max. junction temperatur, på 135 °C.

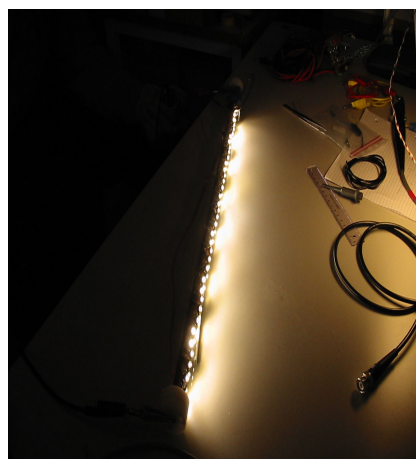
### 5.2.3 Det bærende kobberør og endestykkerne

Grunden til at radialplanerne (som de vel egentlig ikke længere kan kaldes!), er opbygget som rør, er at de kan monteres uden på et langt kobberør, som skal gå næsten hele vejen igennem prototypen. Dette rør skal dels virke som den primære bærende del af prototypen, og dels bidrage til transporten af varme væk fra radialplanerne. I den ene ende af røret monteres et endestykke som passer ind i fatningen på et armatur, i den anden ende monteres printet med strømforsyningen.

Den varme luft inde i røret kan slippe ud igennem endestykket, igennem det dertil indrettede hul. Inde i røret findes desuden to ledninger, en til at forbinde stikkene i endestykket med strømforsyningen, og en anden til at forbinde den ene ende af serieforbindelsen med strømforsyningen. Serieforbindelsen af radialplanerne monteres på røret som vist herunder. Hver anden radialplan er roteret ca. 30 grader i forhold til naboen, for at forbedre lysspredningen yderligere. De 14 radialplaner er forbundet i serie, med en kort ledning imellem dem.



Figur 5-23: Kobberrøret med de 14 radialplaner påmonteret.



Figur 5-24: Lysudstrålingen fra de 56 lysdioder på kobberrøret.

Strømforsyningen, som beskrives i næste afsnit, monteres i forlængelse af kobberrøret, vha. et lille kobberrør med et passende hak til printpladen. Se billedet herover. På den anden side af strømforsyningens printplade, monteres det andet endestykke. Således at røret får en længde på 590 mm excl. stik, og 600 mm incl. stik. Hele konstruktionen indsættes i et plexiglasrør, for at afskærme og give et flot finish. I modsætning til de andre prototyper, har plexiglasrøret nemlig, pga. kobberrøret, ikke nogen bærende mekanisk opgave. Derved er det muligt at teste prototypen uden det lystab, fra refleksion, som måtte komme fra indersiden af plexiglasrøret.

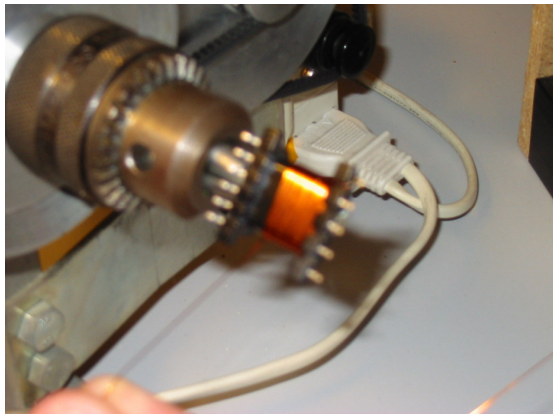
## 5.2.4 Strømforsyningen

Som den eneste af de tre prototyper anvender denne prototype ikke en direkte serieforbindelse af lysdioderne, men derimod en rigtig strømforsyning. Det skyldes at der ganske enkelt ikke er lysdioder nok til klare spændingsfaldet på 325 V. De 56 lysdioder ville kun klare et spændingsfald på  $56 \cdot 3 = 168$  V, hvorved  $325 - 168 = 157$  V ville gå til spilde. Eftersom dioderne skal have 350 mA igennem sig, ville det svare til et energitab på  $157 \cdot 0,35 = 55$  W! Det er selvsagt ikke ønskværdigt, da det jo er meningen at prototypen skal erstatte et lysstofrør, som kun bruger 18 W! Det skal dog med det samme siges at denne prototype pt. ikke forventes at kunne konkurrerer med lysstofrøret på effektiviteten. De 56 lysdioder vil uanset strømforsyningsteknologi, i sig selv, minimum forbruge  $168 \cdot 0,35 = 58,8$  W. Så det er altså igen et spørgsmål om at lysdioderne skal blive bedre før end prototypen kan blive god nok til at konkurrerer med lysstofrøret.

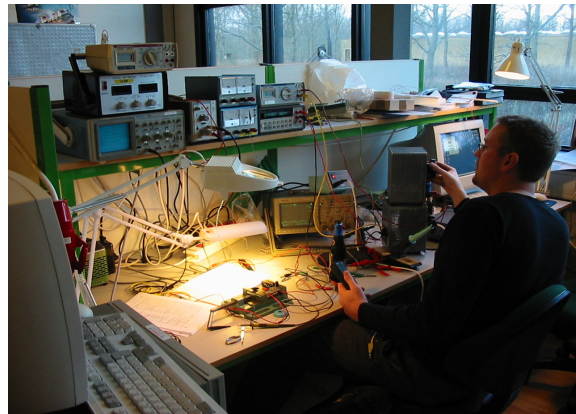
For at udnytte energien bedst muligt er prototypen derfor nødsaget til at indeholde en strømforsyning. Den skal omdanne de 230 VAC fra lysnettet, til en brugbar spænding for radialplanerne. Hvis radialplanerne kobles som i 1. prototype, med 7 grene på hver 8 lysdioder, kræves kun 27 VDC, men tilgængæld en strømbegrænsning på 350 mA, på hver gren. Hvis radialplanerne derimod alle kobles i serie, kræves der som før omtalt 168 VDC, men tilgængæld kun een strømbegrænsning. Den sidste løsning må siges at være mest enkel, men tilgængæld har den også den ulempe, at hvis

en lysdiode brænder af (afbryder), så slukker hele serien. Lysdioderne burde ikke brænde af, hvis blot max. strømmen igennem dem, og max. temperaturen, ikke overskrides. Eftersom kølingen burde være tilstrækkelig, i kraft af det overdimensionerede kobberrør, og strømmen kan styres med en strømbegrænser, bør en serieforbindelse af alle 14 radialplaner være sikker nok til at anvende her.

Strømforsyningsteknologi er en videnskab for sig selv. Der findes grundlæggende to kategorier af strømforsyninger: lineære og switch-mode (SMPS). En lineær strømforsyning anvender en transformator til at omforme strømmen, hvorimod en switch-mode "klipper" strømmen ud i mindre bidder, således at gennemsnittet af spændingen omdannes. Switch-mode har en lang række fordele i forhold til den lineære, den er f.eks. mere effektiv og langt mere kompakt. Hvilket begge må siges at være gode argumenter for at vælge switch-mode til dette projekt.

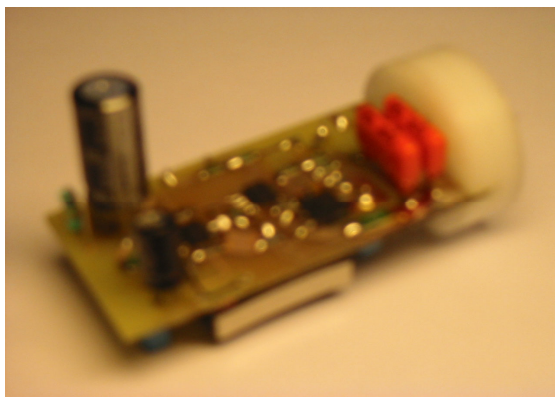


Figur 5-25: Transformatoren til strømforsyningen vikles manuelt. Da den ikke fås som standard i den ønskede ultra kompakte form, som er nødvendig til dette projekt.

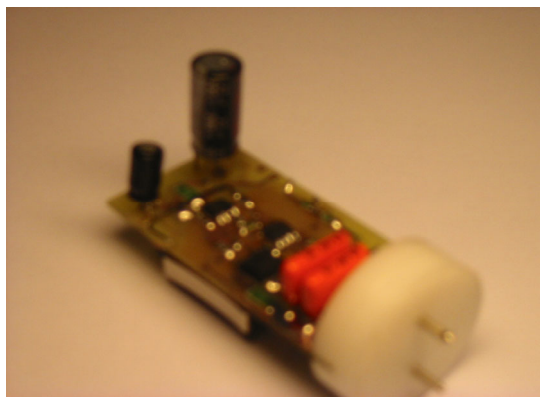


Figur 5-26: Strømforsyningen designes, konstrueres og testes af Frank Johnson på DTU.

Eftersom udvikling af en switch-mode strømforsyning, til denne prototype, ville være et projekt i sig selv, og jeg ikke selv besider den fornødne viden til det, var første tanke at købe en færdig switch-mode forsyning til indbygning i prototypen. Der ville dog stadig være en del besvær ved at finde en som netop passede til prototypens krav, så da min medstuderende Frank Johnson tilbød at udvikle en strømforsyning specielt til prototypen, tog jeg straks imod. Frank er ved at have afsluttet elektro civilingeniør studiet, og fik oprettet udviklingen af denne strømforsyning som et specialkursus, hvorved det indgår i hans uddannelse. Frank har, imodsætning til jeg selv, speciale i effektelektronik og switch-mode strømforsyninger, derfor må han siges at være den rette til jobbet.



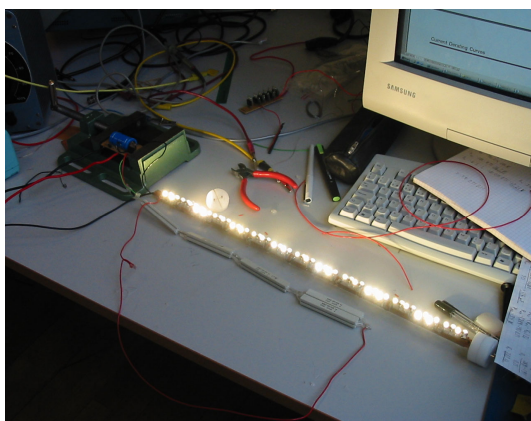
Figur 5-27: Strømforsyningen som Frank konstruerede. Desværre nåede den ikke at fungere inden prototypen skulle vises for Schott Termofrost.



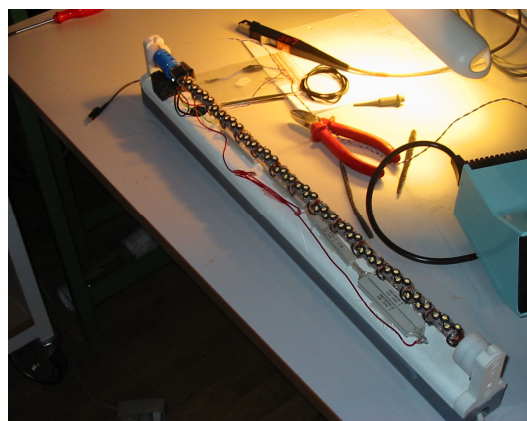
Figur 5-28: Strømforsyningen set fra den anden side, med et påmonteret endestykke i front.

Til strømforsyningen blev opstillet følgende krav: som input skal den tage almindelig netspænding på 230 VAC, ved 50 Hz. Som output skal leveres en DC spænding til at drive alle 56 lysdioder. Om de alle sættes i serie, eller de deles op i parallelle grene, er som udgangspunkt underordnet. Det vigtigste er blot at der ledes 350 mA igennem hver af de 56 lysdioder, helst ikke under, og under ingen omstændigheder mere! Som tidligere beskrevet blev alle 56 lysdioder koblet i serie. Det er en beslutning taget på baggrund af Franks vurdering af at det vil være det optimale mht. strømforsyningens effektivitet og enkelthed. Et særligt krav til en strømforsyning, til denne prototype, er at den skal være ultra kompakt. Idet den skal kunne være inde i plexiglasrøret, med en indvendig diameter på 32 mm, og samtidig ikke fylde alt for meget af rørets længde. Efter et hurtigt skøn kom vi frem til at 60 mm måtte være en tilstrækkelig længde for strømforsyningens printplade. Et sidste krav er, som til de fleste strømforsyninger, at den gerne må være energibesparende og effektiv. Det er dog nedprioriteret en hel del i dette tilfælde, fordi strømforsyningens tab, vil blegne i forhold til den effekt lysdioderne bruger. Strømforsyningen er beskrevet nærmere i vedlagte rapport, som Frank har udarbejdet i forbindelse med projektet. Diagrammet for strømforsyningen findes i appendix.

Desværre nåede switch-mode strømforsyningen ikke at komme til at virke inden den aftalte præsentation for Schott Termofrost. Derfor blev der, få timer før præsentationen, iværksat en "plan b". Planen gik ud på at opbygge en simpel strømforsyning, blot med det formål at få lysdioderne til at lyse, og ikke tage hensyn til strømforsyningens effektivitet. Eftersom Schott Termofrost i første omgang er interesseret i at se at den nye prototype afgiver mere lys, end den hvide prototype, som blev præsenteret tidligere, ville denne plan være bedre end blot at vise et lysrør som ikke virker.



Figur 5-29: Nødstrømforsyningen til venstre, kobbertrådet med tændte lysdioder i midten. Herunder anes de fem effektmodstande, som sluger den overskydende energi.

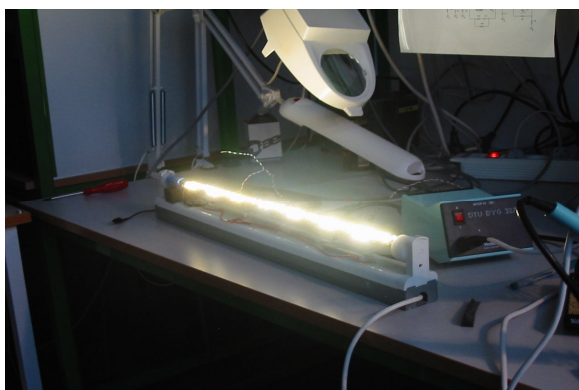


Figur 5-30: Den varm hvide prototype, med nødstrømforsyning, monteret i armatur, klar til fremvisning.

Nødstrømforsyningen bygger på samme princip som dem der anvendes til de andre prototyper. Dvs. direkte ensretning af netspændingen til 325 VDC. I denne prototype er problemet, som sagt, bare at der ikke er nok lysdioder til at klare et spændingsfald på 325 VDC. Derfor indsættes en række effektmodstande i serie med lysdioderne, til at sluge at den overskydende effekt. Den overskydende effekt omsættes til varme, og der er derfor på ingen måde tale om effektiv strømforsyning. Det skal bemærkes at denne strømforsyning udelukkende har til formål at få lysdioderne til at lyse, inden den aftalte deadline. Med nødstrømforsyningen kommer prototypen til at anvende ca.  $325 \cdot 0,35 = 113,75$  W, hvilket selvfølgelig er langt over det der var målet med switch-mode strømforsyningen. Men til gengæld blev prototypen klar til demonstration for Schott Termofrost...

### 5.2.5 Test og fremvisning

Prototypen trækker, som den er nu, langt mere strøm end et lysstofrør. Balasten i det armatur som anvendes til af prototyperne, begrænser den mængde strøm som kan løbe ind i lysstofrøret/prototypen. Eftersom armaturet er beregnet til 18 W lysstofrør, er det meget naturligt at balasten begrænser effekten til 20 W. Problemet er bare at denne prototype bruger 114 W! Derfor må balasten by-passes, for at prototypen skal kunne fungere i armaturet.



Figur 5-31: Test af den varme hvide prototype. Selvom den kun lyser med ca. 80 % af sin fulde styrke, virker den stadig kraftig.



Figur 5-32: Udstålingen fra den varme hvide prototype er tilnærmelsesvis kontinuert, ligesom et lysstofrør.

Målinger viser at prototypen, med nødstrømforsyningen, ikke lyser helt så kraftigt som det ville være muligt med switch-mode strømforsyningen. Lysdioderne får kun ca. 310 mA igennem sig, imod de 350 mA, som var planlagt. Det skyldes at de effektmodstande som anvendes i nødstrømforsyningen, ikke har helt den rigtige værdi, men blot er dem som pt. var tilgængelige. Den nedsatte strøm medfører at prototypen kun lyser med ca. 80 % af sin fulde styrke. Alligevel virker lysstyrken overvældende, og alt for skarp til at man kan kigge direkte ind i lysdioderne.

Den 17/1-2005 blev prototypen demonstreret for Jan Petersen fra Schott Termofrost. Han var, trods nødstrømforsyningen, meget begejstret for prototypens lysstyrke. Det var oprindeligt meningen at Jan skulle have prototypen med til Schotts udviklingsafdeling i Stockholm, for at vise den for den øverste ledelse. Han mente dog imidlertid at det ville gøre mere gavn hvis vi prøver at få switch-mode strømforsyningen til at virke inden den 15/2-2005, således at han kan have den med til en køle/fryse-messe i Düsseldorf, hvor Schott Termofrosts øverste ledelse også vil være til stede. Derved er prototypen også hjemme, således at den kan blive testet hos Delta, sammen med de andre prototyper, fredag 21/1-2005. Så udviklingen af denne prototype vil fortsætte, men det bliver først efter dette projekts afslutning.

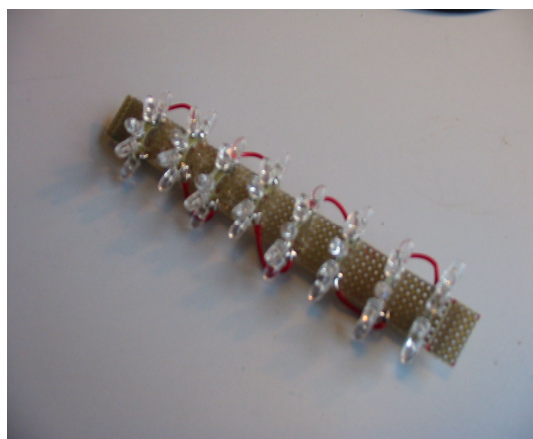
### 5.3 Den gule prototype

Denne prototype skal som tidligere nævnt anvende lysdioder af typen LLY53060, og ialt levere en lysstrøm på min. 1150 lm. I følge beregningerne skulle lysdioderne kunne udsende 6,98 lm pr. stk. Derfor skal der egentlig bruges  $1150/6,98=165$  lysdioder til prototypen. Hver lysdiode skal have 2,5 V over sig, for at levere de 6,98 lm. Hvis prototypen, ligesom den hvide skal konstrueres, ved at organisere lysdioderne i en række serieforbindelser med 325 VDC over sig (230 VAC ensrettet), vil det altså kræve et samlet spændingsfald på  $2,5*165=412,5$  V. Hvilket vil sige at to serieforbindelser (grene) er nødvendige, og såfald vil der skulle gå  $(2*325)-412,5=237,5$  V til spilde. Så valget står imellem enten at gøre lysstyrken kraftigere end nødvendigt ved at indsætte flere dioder end nødvendigt, således at begge grene udnyttes optimalt, eller at nøjes med en gren, og så gå lidt ned i

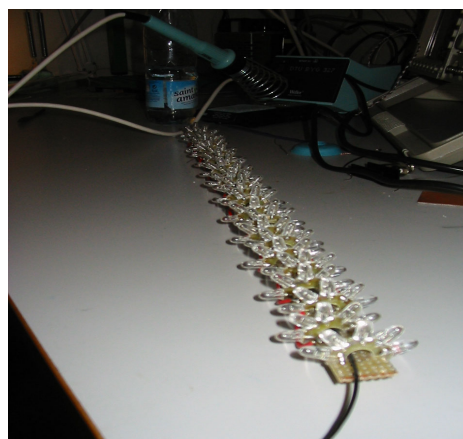
lysstyrke. Ved at gå ned til een gren bliver der kun plads til  $325/2,5=130$  lysdioder, hvilket er 35 mindre end ønsket. Ved at bruge to grene, skal der anvendes 260 lysdioder, for at undgå spild, hvilket er  $260-165=95$  mere end nødvendigt. Eftersom den minimale ændring i lysudbyttet sker ved kun at anvende en gren, må det siges at være det optimale, når der ønskes anvendt en direkte ensretning af netspændingen.

### 5.3.1 Radialplanerne

Lysdioderne er ligesom i den hvide prototype organiseret i såkaldte radialplaner. For at forenkle fremstillingen af prototypen, anvendes samme printplader (radialplaner) som dem til den hvide prototype. Radialplanerne har oprindeligt plads til 9 lysdioder hver. Eftersom denne prototype kun skal bestå af 130 lysdioder, ville det derfor kun kræve  $130/9=14,4 \approx 15$  radialplaner. Så få radialplaner vil give meget store mellemrum imellem radialplanerne, når de skal fordeles over et rør på 59 cm. En løsning på dette problem er at begrænse udstrålingen fra 360 til 180 grader, derved skal der side færre lysdioder pr. radialplan, og der skal derfor bruges flere radialplaner, for at have plads til de 130 lysdioder.



Figur 5-33: 8 gule radialplaner forbundet i serie på et Veroboard.



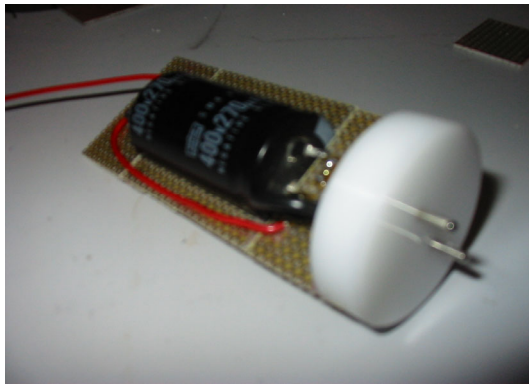
Figur 5-34: Alle Veroboards med radialplaner monteret i forlængelse af hinanden.

Hvis et radialplan kun skal udstråle lys på halvdelen af omkredsen, er det kun nødvendigt med 5 lysdioder pr. radialplan. Dermed kræves der ialt  $130/5=26$  radialplaner til denne prototype. Derved kræver hver radialplan  $5*2,5=12,5$  V over sig for at give den ønskede lysstrøm på  $5*6,98=34,9$  lm. Med en konfiguration på ialt 130 lysdioder, skulle prototypen komme til at afgive en samlet lysstrøm på  $130*6,98=907$  lm.

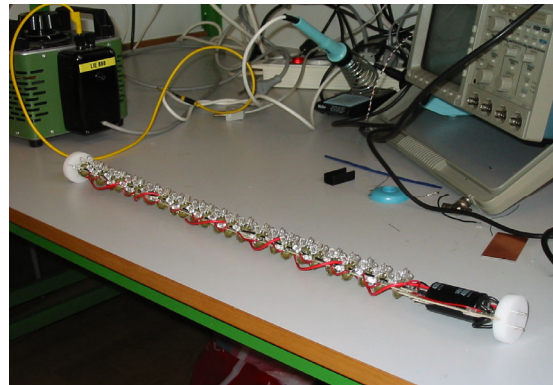
### 5.3.2 Strømforsyningen

Som ved den hvide prototype kan her, som sagt, med fordel anvendes en direkte forsyning fra en ensrettet netspænding (325 VDC). Derfor ønskes de 26 radialplaner koblet i een serieforbindelse. Hver enkelt lysdiode må max. få 35 mA igennem sig, derfor er det også det der max. må gå igennem serieforbindelsen. Denne strømbegrænsning opretholdes, ligesom i den hvide prototype, af en strømbegrænsner.





Figur 5-35: Strømforsyningen til den gule prototype, monteret på endestykke.



Figur 5-36: Den færdigmonterede gule prototype, uden plexiglasrøret.

De 26 radialplaner, som skal forbindes i serie, monteres på nogle Veroboards, for at spare tid. Verobordene sidder i forlængelse af hinanden, således at de tilsammen udgør 58 cm (derved er der 2 cm til endestykker og stik). Radialplanerne er individuelt forbundet elektrisk med ledninger, som det ses på billederne herover. På det sidste Veroboard i rækken sidder strømforsyningen der, ligesom i de to andre prototyper, består af en ensretterbro og en strømbegrænser.

Strømbegrænseren bygger, ligesom i den hvide prototype, på en LM317 kreds. Feed-back modstanden beregnes med følgende formel:

$$I_f = \frac{V_{REF}}{R} \Rightarrow R = \frac{V_{REF}}{I_f} = \frac{1,25}{0,035} = \underline{35,7\Omega}$$

Da 35,7 ohm ikke er en standard modstand, anvendes istedet en på 36 ohm. Effekten som afsættes i modstanden er derfor:

$$P_R = R \cdot I^2 = 36 \cdot 0,035^2 = \underline{0,044W}$$

En småsignal modstand på 0,25 W, er derfor mere end rigeligt til dette formål. For at mindske tabet af effekt i strømbegrænseren, vælges, som i den hvide prototype, en LM317-version med en minimal min. drop-down spænding. LM317S er velegnet da den har en min. drop-down spænding på 1,25 V.

For at netspændingen kan bruges af lysdioderne, skal den først ensrettes og udglattes. Det gøres ligesom i den hvide prototype med en ensretterbro (rectifier) og en kondensator. Igen anvendes en ensretterbro af typen DF04M. Kondensatoren er dog ikke den samme, idet strømforbruget i denne prototype er væsentligt mindre (35 mA). Kapaciteten beregnes med følgende formel:

$$C = \frac{I_L \cdot T}{V_r} = \frac{0,035 \cdot 0,01}{2} = \underline{175\mu F}$$

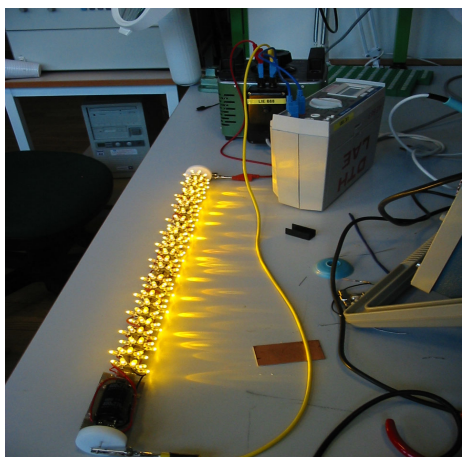
Eftersom det ikke er en standard værdi, vælges istedet en kondensator på 220  $\mu$ F. Hvilket resulterer i en mindre ripplespænding på:

$$C = \frac{I_L \cdot T}{V_r} \Rightarrow V_r = \frac{I_L \cdot T}{C} = \frac{0,035 \cdot 0,01}{220 \cdot 10^{-6}} = \underline{1,59V}$$

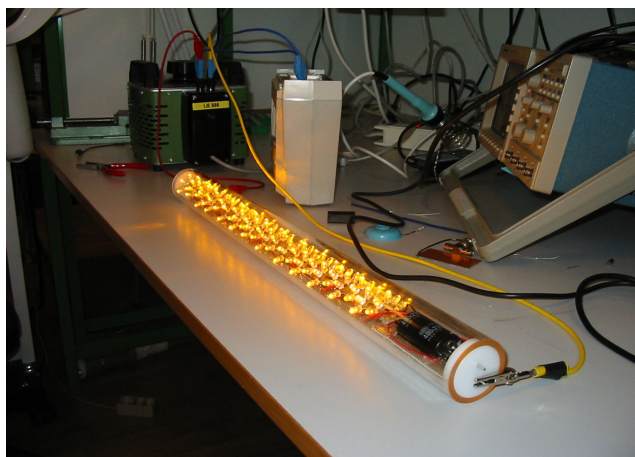
Den mindre ripplespænding gør blot at lysudbyttet bliver bedre end først antaget. Ligesom den hvide prototype skal den gule indbygges i et plexiglasrør med en ydre diameter på 50 mm. I enderne monteres endestykker identiske med dem som blev brugt i den hvide prototype

### 5.3.3 Test

Denne prototype skal i modsætning til de andre prototyper ikke pt. fremvises for en potentiel investor. Den gule prototype er især målrettet imod gadebelysning, og udendørsbelysning generelt, og det var planen at den på sigt skulle kunne konkurrerer med de traditionelle højtryk-natriumlamper på lysudbyttet, men der kommer tilsyneladende til at gå noget tid endnu før lysdioderne er gode nok.



Figur 5-37: Test af den gule prototype uden plexiglasrør.



Figur 5-38: Test af den gule prototype, monteret i plexiglasrør.

En typisk højtryk-natrium lampe som anvendes til udendørsbelysning, har et lysudbytte på 110 lm/W. Hvorimod de gule lysdioder, som anvendes i denne prototype, har et langt mindre lysudbytte. Derfor vil den gule version af lysrøret uden tvivl, være den af de tre prototyper, som sidst bliver fordelagtig.

## 6 Test af prototyperne

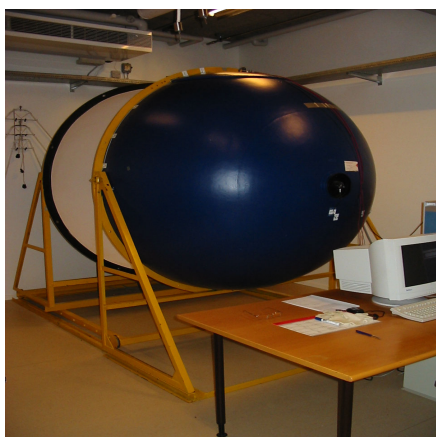
Som den afsluttende fase i PSO-projektet, skal resultatet testes og evalueres. Dvs. at prototyperne skal testes, for om hvorvidt de lever op til kravspecifikationen. Her lægges især vægt på deres belysningstekniske egenskaber, dvs. lysstrøm, farvetemperatur og Ra-index, men også på lysudbyttet (lm/W). Testen af prototyperne foretages af Delta Lys & Optik, der er specialister i bl.a. at teste lyskilder, herunder lysstofrør. De resulterende testrapporter fra Delta er vedlagt som bilag.

### 6.1 Måling af lysstrøm

En lyskildes lysintensitet (candela, cd) varierer oftest meget afhængig af hvilken retning den måles. Derfor er man i princippet tvunget til at tage målinger fra alle vinkler i forhold til lyskilden, og summere op, for at få en værdi for den samlede lysstrøm (lumen, lm). Hvilket gøres som tidligere beskrevet i rapporten. En langt enklere måde er at samle alt lyset fra lyskilden, og måle det centralt. Derved er der ikke blot tale om summering af nogle diskrete summer, men en egentlig integration af det samlede lys. Herved opnås samtidig et langt mere præcist måleresultat.

Den totale lysstrøm, udsendt fra en lyskilde, måles derfor ved at nedsænke lyskilden i en hul kugle, en såkaldt fotometerkugle, med en diameter på 2 m. Indersiden af kuglen er malet med en speciel hvid maling, som reflekterer 80 % af lyset. Pga. at lyset reflekteres rundt inde i kuglen vil lysstrømmen være ens, på et hvilket som helst punkt i kugleoverfladen. Derfor kan lysstrømmen måles med et luxmeter placeret i et lille hul i kuglens overflade. Luxmeterværdien kan så omregnes til en samlet lysstrøm, ved at multiplicerer den med en konstant, som er afhængig af kuglens dimensioner og refleksionsevne. For at luxmeteret ikke skal modtage direkte lys fra lyskilden, er det afskærmet med en reflekterende plade, placeret ca. 30 cm udfor luxmeteret. Derved modtager luxmeteret kun lys som min. har været reflekteret een gang, fra kuglens indre flade.

Fotometerkuglen er opbygget af to halvkugler, således at den kan åbnes. I den ene halvkugle er luxmeteret monteret. På samme position i den anden halvkugle er monteret en referencelyskilde, som kan afgive en meget konstant lysstrøm. Referencelyskilden bruges til at kompensere for det lys som absorberes af armatur, ledning m.m., som bruges for at tilslutte den lyskilde som skal måles. Ved at indstille referencelyskilden til en kendt lysstrøm, med testlyskilden slukket, kan absorptionstab i armatur m.m. beregnes. Dette lysstrømstab lægges derefter til den målte lysstrøm, fra testkilden, for at få den nøjagtige lysstrøm.



Figur 6-1: Fotometerkuglen som anvendes til måling af lysstrøm. De to halvkugler er skudt fra hinanden, så lyskilden kan monteres indeni.



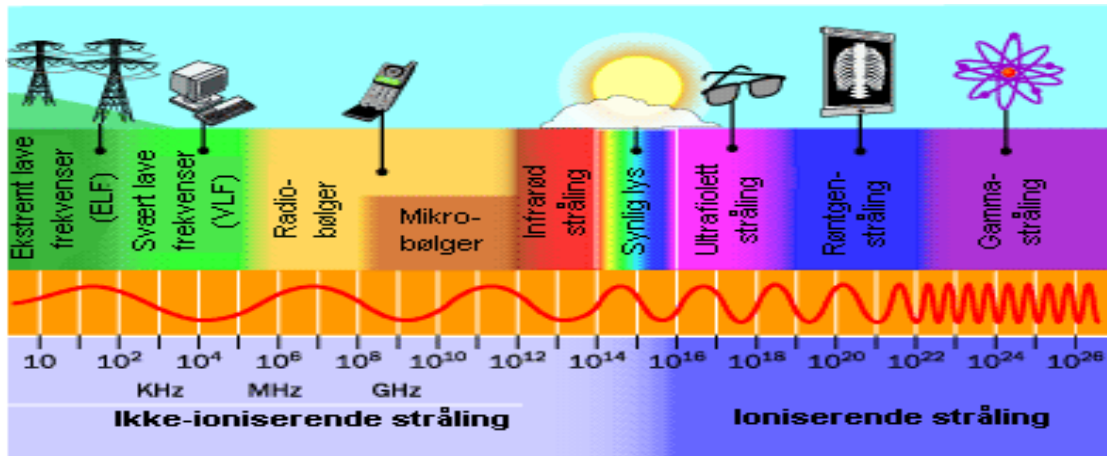
Figur 6-2: Det samlede udstyr til måling af lysstrøm. Til venstre ses den lukkede fotometerkugle, til højre ses måleinstrumenter og strømforsyning.

De lyskilder som skal måles, skal i langt de fleste tilfælde forsynes med almindelig netspænding på 230 VAC. Det er også tilfældet for prototyperne i dette projekt. For at måleresultatet skal være pålideligt er det dog ikke nok bare at slutte lyskilden til stikkontakten. Typisk varierer netspændingen nemlig imellem 220 og 240 VAC, og frekvensen er heller ikke altid perfekt sinusformet på 50 Hz. Disse mulige afvigelser kan gøre at lyskilden opfører sig ustabil. Derfor forsynes lyskilden med strøm fra en meget stabil spændingsforsyning på præcis 230 VAC med en frekvens på 50 Hz. Til strømforsyningen er der desuden tilsluttet et wattmeter, så lyskildens effektforbrug kan overvåges.

Luxmeteret er opbygget af en silicium fotodiode, der har en gennemgangsstrøm direkte proportional med den målte værdi. Fotodioden sidder i en strømsløjfe, hvori der også sidder et digitalt amperemeter til at måle gennemgangsstrømmen. Ved at anvende en strømsløjfe, går målesignalet ikke tabt i ledningen. Ved så at multiplicere den aflæste gennemgangsstrøm med en konstant, fås den målte lumen-værdi. Fotodioden er korrigeret således at den har samme spektrale følsomhed, som det menneskelige øje. Dvs. lyset måles på samme måde som hvis det var opfattet af et menneske.

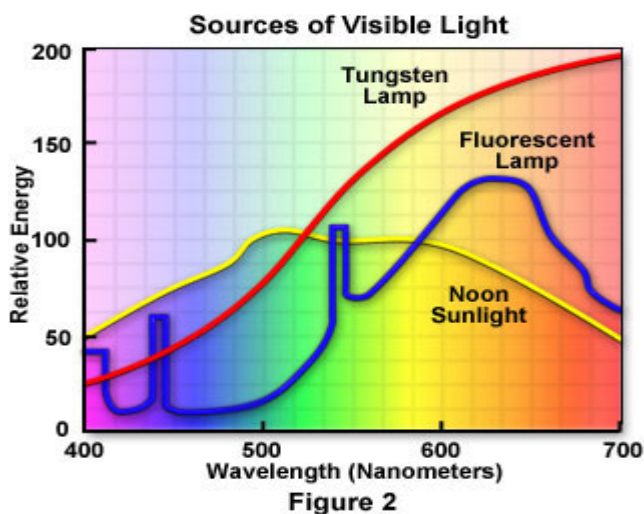
## 6.2 Måling af spektral effektfordeling

Alt lys er i virkeligheden elektromagnetisk ståling, ligesom det f.eks. er tilfældet for radiobølger og mikrobølger. Lys er blot den del af det elektromagnetiske spektrum, som har en bølgelængde imellem 100 nm (ultraviolet) og 10000 nm (infrarød). Synligt lys er den yderst begrænsede del af lysspektraet, som er synligt for mennesker, fra 380 nm (violet) til 780 (rød). Se det samlede spektrum herunder.



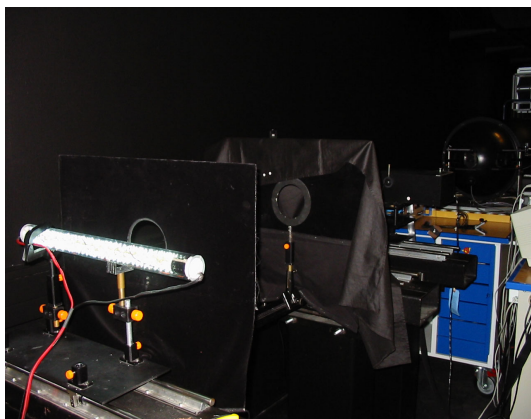
Figur 6-3: Det elektromagnetiske spektrum, som lys blot er en lille del af.

En perfekt hvid lyskilde ville udsende lige meget af alle bølgelængder fra 380 nm til 780 nm. Hvorved alle farver ville blive gengivet ligeligt. Lige gyldig hvilken farve væg lyskilden skulle belyse. I praksis er der dog ingen lyskilder, der udsender nøjagtig ens effekt i alle synlige bølgelængder. Det er derfor interessant at vide hvor stor en del af lyskildens samlede effekt der udsendes på hver bølgelængde, og bruge det som en indikation for god den er til at gengive de enkelte farver. Udfra denne spektrale effektfordeling, kan så beregnes en række indikatorer for lyskildens kvalitet. Heriblandt Ra-index og farvetemperatur, som der er krav til, i dette projekt.



Figur 6-4: Spektralfordelinger for forskellige lyskilder. Den gule kurve er lyset fra middagssolen, den blå kurve lyset fra et lysstofrør, og den røde kurve lyset fra en tungsten lampe.

Den spektrale effektfordeling for elektromagnetisk stråling, måles generelt med et radiospektrometer. Men når der er tale om lys, måles det med et fotospektrometer. Deltas fotospektrometer er placeret i et mørklagt laboratorium (se billederne herunder). Lyskilden som skal testes monteres på en bænk, således at dens lys udsendes igennem et hul ind til selve fotospektrometeret.



Figur 6-5: Lyskilden som skal testes monteres foran fotospektrometeret, der findes bag stofklædet i baggrunden.



Figur 6-6: Måleprocessen styres og overvåges af en computer. Samlet pris for udstyret ca. en halv million kr!

Fotospektrometeret virker i princippet på samme måde som et prisme der splitter lyset op i alle regnbuens farver, er så måler lysstyrken i hver farve. Her er det blot et holografisk filter, som splitter lyset. Filtret kan drejes meget præcist med en steppermotor, hvorved kun en bølgelængde ad gangen, rammer fotosensoren. Fotosensoren virker på samme måde som den der blev anvendt til lysstrømsmålingerne, blot med den forskel at den her er lige følsom overfor alle synlige bølgelængder. Imodsætning til den anden, der havde samme følsomhed som det menneskelige øje.

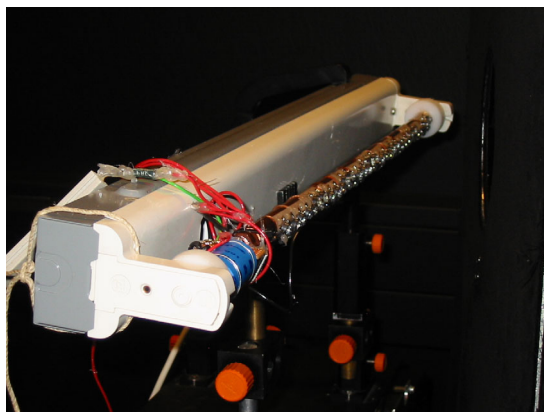
Når den spektrale effektfordeling er fundet, kan kvalitetsparametrene: Ra-index og farvetemperatur beregnes. Eftersom det er nogle relativt komplicerede beregninger, foretages det med et specielt udviklet program, som Delta har til rådighed.

### **6.3 Test af den varm hvide prototype**

Testforløbet foregår således at alle prototyperne først får deres lysstrøm målt i fotometer kuglen. Herefter flyttes alle prototyperne til et andet laboratorium, hvor deres spektrale effektfordeling måles. Den første prototype til at få målt lysstrøm, var den varm hvide. Som den eneste af de tre prototyper, er den nødsaget til at side i det medbragte armatur, under testen. Det skyldes som tidligere nævnt, at den er opbygget med en nødstrømforsyning, bestående af en række effektmodstande, monteret direkte på armaturet. Netop pga. effektmodstandene, som fylder en hel del, er prototypen, som den eneste heller ikke monteret i et plexiglasrør (acrylkappe).



Figur 6-7: Den varm hvide prototype monteret til test i fotometerkuglen.



Figur 6-8: Den varm hvide prototype opstillet til test ved fotospektrometret.

Den normale procedure ved test af lyskilder i fotometerkuglen, er at lyskilden skal være tændt i ca. en halv time, indtil lysstrømmen er blevet stabil, før målingen foretages. Det er normalt at lysstrømmen fra en lyskilde stiger, efter den er blevet tændt, indtil den når en max. værdi. Men det var ikke tilfældet for den varm hvide prototype. Lige da den blev tændt, havde den en lysstrøm på ca. 700 lm, men efter ca. 10 min., lå den stabilt nede på de 466 lm, som testresultatet viste.

Lysdioder vil normalt også udsende mere og mere lys i det første stykke tid efter de er blevet tændt, indtil de når en max. værdi. Det kræver dog at de ikke bliver for varme, og det var netop det der var problemet i denne situation. Da fotometerkuglen blev åbnet efter de 10 min., var effektmodstandene blevet så varme, at de havde smeltet den varmelim de var monteret med, og derfor hang frit ned fra armaturet. Kobberrøret som lysdioderne er monteret på, var også blevet så varmt at nogle af dioderne sad løse, det samme gjorde strømforsyningen, som er monteret i enden af kobberrøret. Den stærkt dalende lysstrøm skyldes altså at lysdioderne ikke har haft tilstrækkelig mulighed for at komme af med varmen. Det blev skønnet, uden nogle termodynamiske beregninger, at det kobberrør, som lysdioderne sidder på, var tilstrækkelig køling. Varmeudviklingen var undervurderet, og set i bakspejlet, burde disse beregninger havde været gennemført.

Hvis kølingen havde virket optimalt havde lysstrømmen startet på de 700 lm, og i løbet af den næste halve time sandsynligvis forøget sig til ca. 896 lm, svarende til 80 % procent af den maximale lysstrøm for de 56 lysdioder. At de kun når 80 % af den totale lysstrøm på 1120 lm, skyldes at nødstrømforsyningen kun sender ca. 310 mA igennem lysdioderne. Wattmeteret viste, under testen, et faldende effektforbrug, efterhånden som lysstrømmen aftog. Effekten endte på 89,5 W, ved 466 lm, hvilket selvfølgelig ikke giver en brugbar værdi for lysudbyttet. For det første afsættes ca. halvelen af effekten som spild i nødstrømforsyningens effektmodstande. For det andet gør den manglende køling, at lysstrømmen falder markant, og for det tredje begrænser nødstrømforsyningen lysstrømmen til en max. værdi på ca. 896 lm (80 %).

I følge databladet for lysdioderne, kræver de typisk 3,42 V over sig for at trække 350 mA, svarende til en effekt på 1,2 W. Ved en strøm på 350 mA igennem sig, leverer de typisk en lysstrøm på 20 lm, hvilket giver et lysudbytte på  $20/1,2=16,7$  lm/W. Det er selvfølgelig ikke overvældende, men pt. det bedst opnåelige, med de relativt nye varm hvide lysdioder.

Testen i fotospektrometeret, blev overstået meget hurtigt for denne prototypes vedkomne. Ligesom i fotometerkuglen er det normal procedure, at lyskilden skal være tændt ca. en halv time før målingen foretages, for at sikre stabilitet i lyset. Den varm hvide prototype havde åbenbart taget lidt skade af den kraftige opvarmning tidligere, efter ca. 10 minutters drift slukkede prototypen momentant, og testen måtte afbrydes. Det har uden tvivl igen skyldes, at dioderne ikke kunne komme af med varmen.

Heldigvis har strømbegrænsersens spændingsregulator kredse, en indbygget temperatursensor, som sørger for at afbryde strømmen hvis kredsen bliver for varm. Det er højest sandsynligt den der er trådt i kraft. Regulator kredsens køleplade er monteret på kobberet, hvor lysdioderne også er monteret, derfor varmen fra lysdioderne varmet regulator kredsen yderligere op, således at den til sidst blev for varm og afbrød strømmen.

Eftersom alle lysdioderne i prototypen er af samme type, og de i følge databladet har et Ra-index på 90, og en farvetemperatur på 3200 K, kan man dog også gå ud fra at den varm hvide prototype ville have samme lyskvalitet.

#### **6.4 Test af den hvide prototype**

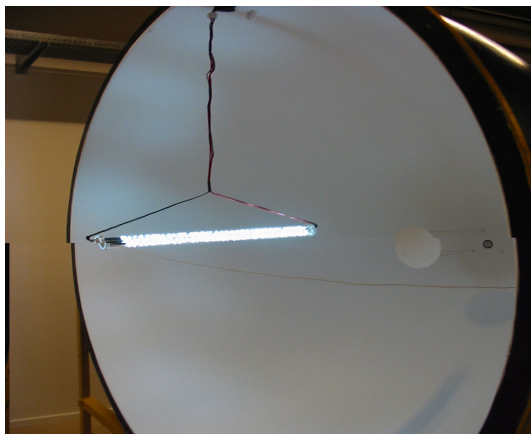
Ligesom med den varmhvide prototype, monteres den hvide prototype i fotometerkuglen, som vist herunder. Den hvide prototype holder en meget mere stabil lysstrøm, end det var tilfældet med den varm hvide prototype. Den falder dog stadig en lille smule i løbet af den halve time, der gik inden målingen blev foretaget, men ikke noget alvorligt, og det er uden tvivl også fordi lysdioderne har besvær med at komme af med alt varmen, når de sidder inde i plexiglasrøret. Testresultatet viste 464 lm, hvilket må siges at være en del mindre, end den forventede lysstrøm på 1150 lm, som var målet for prototypen.

Den mindre lysstrøm kan til dels forklares med at plexiglasrøret, med dets 5 mm tykke sidder, absorbere en hel del af lyset. En anden grund er at lysdioderne ikke får de 20 mA igennem sig, som var kravet for at opnå max. lysstyrke, men derimod kun 18,38 mA, hvilket selvsagt også er med til at give en lavere lysstrøm.

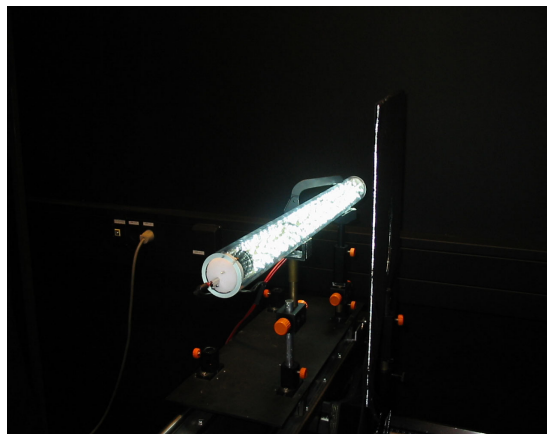
Den primære grund er dog nok at kravet til spændingen over hver enkelt lysdiode, blev fastlagt på baggrund af en test af en enkelt lysdiode af den pågældende type (5W4HCA-U). Denne lysdiode trak en strøm på 20 mA allerede ved en spænding på 3,0 V over sig. Lysdiodernes karakteristikker varierer utroligt meget, selvom der er tale om samme type. I følge databladet for lysdioden, skal de typisk have 3,2 V over sig, for at trække de ønskede 20 mA. Så der er altså meget stor sandsynlighed for at de fleste lysdioder i



prototypen, ganske enkelt ikke har nok spænding over sig, til at trække de 18,38 mA (som strømbegrænsere har begrænset strømmen til), og hvis bare en lysdiode i en serieforbindelse ikke har nok spænding over sig, til at trække denne strøm, er der heller ikke andre lysdioder i serien som kan få denne strøm igennem sig. Dette problem kunne have været undgået ved at stille spændingskravet, som hver diode skal have over sig, ud fra databladet, fremfor en enkeltstående test af en lysdiode.



Figur 6-9: Den hvide prototype monteret til test i fotometerkuglen. Bemærk at røret hænger på langs i forhold til fotodioden, således at den ikke modtager noget direkte lys.



Figur 6-10: Den hvide prototype opstillet til test ved fotospektrometret.

Under testen var wattmeteret ikke i stand til at måle effekten kontinuerligt. Det kan skyldes at der, pga. den meget lille ripplespænding for kondensatoren, kun trækkes strøm i en meget kort periode, hvor wattmeteret ikke når at sample. Et sådan strømtræk er elselskaberne ikke glade for at få tilsluttet til deres net, så det er helt sikkert et problem der skal kigges nærmere på, ved videreførelsen af dette projekt. Wattmeteret viste kortvarigt en effekt på 9,8 W, men advarede samtidig om usikkerheden, pga. det ikke kunne foretage nok ensartede samlinger i træk.

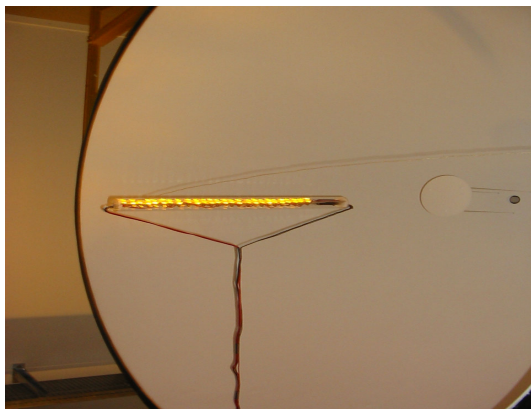
Imodsætning til den varm hvide prototype, gennemførte den hvide prototype testen i fotospektrometret. Testen resulterede i et Ra-index på 81,9, og en farvetemperatur på 8805. I kravspecifikationen står der at Ra-indexet skal være på minimum 80, og farvetemperaturen imellem 2700 og 6500 K. Så Ra-indexet er ok, men farvetemperaturen en smule i overkanten.

## 6.5 Test af den gule prototype

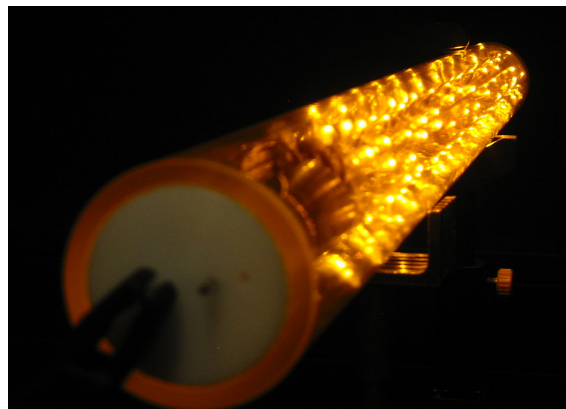
Den gule prototype monteres ligesom de to andre i fotometerkuglen. Resultatet viste en lysstrøm på 96 lm, hvilket selvfølgelig er en hel del under den ønskede lysstrøm på 907 lm. Der er en række grunde til at lysstrømmen er målt til ca. 10 gange mindre end det forventede. En grund er ligesom i den hvide prototype, at en stor del af lyset absorberes i plexiglasrøret. Som det ses på billedet herunder til højre, lader det faktisk også til at der absorberes mere af det gule lys, i forhold til hvor meget der blev absorberet af det hvide.

Hvis det er tilfældet skyldes det at absorptionen i plexiglasrøret, er afhængig af lysets bølgelængde. Den gule prototype er tilnærmelsesvis monokromatisk (koncentreret omkring en bølgelængde), og det er åbenbart en bølgelængde (ca. 600 nm), som har svært ved at trænge igennem plexiglasrøret.

Som i den hvide prototype var der problemer med at måle den afsatte effekt, hvilket skyldes at de bruger samme strømforsyningsteknologi (direkte ensretning af netspændingen). Så det er også et problem der skal løses for denne prototype.



Figur 6-11: Den gule prototype til test i fotometerkuglen.



Figur 6-12: Den gule prototype til test ved fotospektrometeret. Bemærk hvor meget lys der går tabt i plexiglasrøret.

Ligesom i den hvide prototype, har en upræcis feed-back modstand i strømbegrænseren, også lidt af skylden. Modstanden er 0,3 ohm større end den burde være, og selvom det ikke er meget, har det stadig lidt at sige. I følge testen skulle lysdioderne hver forsynes med et spændingsfald på 2,5 V, for at trække de ønskede 35 mA. Som ved den hvide prototype, bygger denne opløsning på en enkelt test af en lysdiode af typen LLY53060 (den som anvendes i den gule prototype). Her siger databladet dog at lysdioden typisk blot skal have 2,2 V over sig for at trække 35 mA, så det kan ikke være det der er grunden i dette tilfælde.

Hvis forsyningsspændingen er 230 VAC, hvilket vi kan regne med under testen, vil den ensrettede spænding være præcis 325 VDC. Men med en ripplespænding på 1,59 V, en min. drop-down spænding over regulatoren på 1,25 V, samt et spændingsfald over feed-back modstanden på  $36 \cdot 0,035 = 1,26$  V, kan spændingen over diodeserien komme ned på:  $325 - 1,59 - 1,25 - 1,26 = 320,9$  VDC. Hvilket giver et spændingsfald på  $320,9 / 130 = 2,46$  V over hver lysdiode. Det er selvfølgelig ikke meget under de ønskede 2,5 V, men alligevel nok til at have en negativ indflydelse på lysstyrken.

Lyskvaliteten for den gule prototype, levede heller ikke helt op til det ønskede. Det var så monokromatisk (udelukkende gult), at det ikke giver mening med et Ra-index, og en farvetemperatur. Den gule prototype, som den er nu kan derfor ikke ses som en mulig erstatning for højt-tryk natrium lamper. Men derimod istedet som en erstatning for lavtryk natrium lamper, som

er meget mere monokromatiske. Der er dog stadig lang vej med hensyn til lysudbyttet, eftersom lavtryk natrium lamper er blandt de aller mest effektive på markedet pt. For at gøre den gule prototypen til en attraktiv konkurrent, til højtryk natrium lamperne, kan der evt. indsættes forskelligt farvede lysdioder, for derved at skabe en bredere spektral effektfordeling, og dermed et bedre Ra-index. Men det rækker uden for dette projekts rammer .

## **6.6 Testkonklusion**

Generelt set må man sige at testresultaterne ikke var helt så gode, som forventet. Til gengæld kan grundene til det, for det meste, forklares. Hvilket giver meget konstruktiv feedback, som kan bruges ved den videre udvikling af dette projekt, og evt. andre lysdiode applikationer. Som ikke bare jeg men forhåbentlig også andre kan drage nytte af.

Mht. lysstrømmen havde samtlige prototyper en langt lavere værdi end forventet. Som nævnt skyldes det primært en underdimensioneret termodynamisk konstruktion, at lysdioderne forsynes med for lav spænding, samt at meget af lyset går tabt i de tykke plexiglasrør. Alle tre ting kan der læres meget af: 1. Husk gennemførte termodynamiske beregninger/simulationer, især for høj-effekt dioder, det er ikke nok med bare et skøn. 2. Forsyn lysdioderne med den typiske spænding i følge databladet. Det er gennemsnittet, for den nødvendige spænding, for en stor mængde dioder, for at de trækker den ønskede strøm. Det er ikke nok med en test af en lysdiode af den pågældende type. Det er for usikkert. 3. Undgå så vidt muligt at sende lyset igennem nogen form for materiale, jo mere det sendes igennem desto mere går tabt. Det betyder også at de gammeldags 3 og 5 mm lysdioder i epoxy bør undgås, til fordel for mindre SMD og chip lysdioder.

Mht. til lyskvaliteten, dvs. den spektrale effektfordeling, Ra-index og farvetemperatur, så gik det straks meget bedre. Den varme hvide holdt ganske vist op med at lyse under testen, men databladet for lysdioden viser at den med et Ra-index på 90, og en farvetemperatur på 3200 K, lever fuldt ud op til kravene. Det samme gjorde den hvide prototype stort set, med et Ra-index 81,9, og en farve temperatur på 8805. Kun den gule prototype skuffede en smule, det var ikke meningen lyset skulle være monokromatisk, selvom det var forventet at det skulle have et meget lavt Ra-index. Der er umiddelbart to måder at løse dette på: Den sigte imod at være en erstaring for lav-tryk natrium lamper, istedet for højtryk natrium lamper. Og/eller der skal indsættes lysdioder med forskellig bølgelængde i prototypen, således at den får en bredere spektral effektfordeling, og derved et højere Ra-index. Ideer til at løse de opståede problemer er der nok af, men en videreførelse af disse, ligger desværre uden for rammerne af dette projekt.

## Fremtidsperspektivering

Under udarbejdelsen af dette projektet, er der opstået en lang ideer til forbedring og videre udvikling af denne opfindelse. Men også til udvikling af nye typer af LED applikationer. Samt ideer til hvordan udviklingsvilkårene, for virksomheder der arbejder i dette felt kan forbedres. Til fordel for alle.

Lysstofrør er stadig blandt de mest effektive lyskilder til almindelig belysning, og vil være det en del år endnu, indtil lysdioder kommer op på et tilpas højt lysudbytte (ca. 50 lm/W). Det er derfor pt. mest relevant at koncentrere udviklingen af LED applikationer til belysning, omkring erstatning af de lyskilder som er de største energisluger, som f.eks. glødelamper og halogenspots o.s.v.

Den gule prototype, som var beregnet til udendørsbelysning, istedet for højt-tryk natrium lamper, viste sig at have en alt for dårlig spektral effektfordeling. Den kan som sådan pt. kun konkurrerer imod den monokromatiske lav-tryk natrium lampe. En måde til at forbedre dens spektrale effektfordeling, kunne være ved at indsætte lysdioder med forskellige bølgelængder (farver), side om side i røret. Det kunne være en idé til en fremtidig videreudvikling af den gule prototype.

Generelt for alle lysdioder gælder det at deres karakteristikker varierer utroligt meget, selvom de er af nøjagtig samme type. Det skyldes små unøjagtigheder under fabrikationen. Fabrikkerne grovsortere ganske vist deres lysdioder, så de er nogenlunde ensartede, men stadig med en temmelig stor usikkerhed. Når lysdioder skal serieforbindes, og især i så store antal som tilfældet er i dette projekt, er det meget vigtigt at de har så ens karakteristikker som muligt. Den lysdiode som trækker mindst strøm, styrer nemlig strømmen i hele serieforbindelsen. Derfor er det vigtigt at sortere lysdioderne yderligere, før konstruktion af prototyperne, således at dem med ens karakteristikker kommer i samme serie. Det blev ikke gjort i dette projekt, men det er stærkt anbefalelsesværdigt til fremtidige lysdiode projekter.

Databladene for de forskellige lysdiode typer, varierer også utroligt meget, og det er en jungle at sammenligne lysdioderne. For det første er mange datablade mangelfulde mht. til lyskvalitet. For det andet er data for lysdioderne målt på vidt forskellige baggrunde. Selvom der oftest både står en værdi for "Min.", "Max." og "Typical"/"Average", er det usikkert hvor mange lysdioder der er testet for at opnå de værdier. Der er stor forskel på om det er 10 eller 1000, netop pga. lysdiodernes varierende karakteristikker. Enkelte datablade angiver simpelthen kun en værdi, der som oftest er "Max" værdien. Det ville derfor være smart hvis databladene for lysdioder, blev homogeniseret, udfra nogle fælles regler.

Det uden tvivl en uoverkommelig opgave, hvis alle producenter skal blive enige om en sådan standard for datablade. Derfor kunne en idé være at oprette en fælles database for lysdioder, med data for alle lysdioder til belysning. Dataene skulle så være indsamlet på baggrund af af ensartede

målinger og tests af f.eks. 1000 lysdioder af samme type, men fra forskellige batches (dvs. forskellige wafers). En sådan database kræver selvfølgelig en hel del ressourcer at opbygge, men den ville være til stor gavn for alle som udvikler og producerer LED applikationer til belysning. Derfor er det oplagt at en sammenslutning af disse, som f.eks. Lysteknisk Selskab, kunne stå bag det. Testene kunne evt. foretages af Delta Lys & Optik, som har alt det fornødne udstyr til opgaven.

Mht. til dette projekt vil udviklingen stadig fortsætte, på trods af at det ikke modtager støtte fra ELFOR i 2005. Selvfølgelig ikke i samme omfang, af økonomiske årsager. Den 15/2-2005 forventes en forbedret version af den varm hvide prototype klar til fremvisning på en køle/frysemesse i Düsseldorf. Håbet er så at Schott Termofrost får skabt så meget interesse omkring opfindelsens muligheder, at de ønsker at lægge kapital i projektet, til den videre udvikling. Den forbedrede version af den varm hvide prototype, skulle gerne have en fuldt ud fungerende switch-mode strømforsyning indbygget, og dermed have et markant bedre lysudbytte.

## Konklusion

Arbejdet med projektet har vist at det kræver meget mere end blot at få nogle lysdioder til at lyse vha. netspændingen i et armatur. Projektet omfatter en lang række videnskabelige områder, udover blot belysningsteknik og elektronik. Termodynamik og materialelære har især vist sig at have meget stor betydning. Ved den videre udvikling af projektet er det derfor meget nødvendigt også at tage højde for disse fagområder. For der er ingen tvivl om at opfindelsen kræver meget udvikling endnu, før den bliver kommercielt attraktiv. Det skyldes primært at lysdiodernes lysudbytte stadig langt fra er godt nok til at konkurrere med lysstofrørene.

Lysdioderne som er anvendt i de tre prototyper, har alle været standard lysdioder som er almindeligt tilgængelige. Det er en klar fordel når der bare skal laves nogle få prototyper hurtigt. Ved masseproduktion, vil det være en klar fordel at designe direkte ud fra de enkelte siliciumchips, som sidder inde i lysdioderne. For på den måde at reducere mængden af materiale, som lyset skal igennem før det kommer ud af røret. De udførte tests har jo netop vist, at der går en hel del lys tabt, dels i diodernes epoxykappe, men især også i det tykke plexiglasrør, som prototyperne er indkapslet i.

Især for den varm hvide prototype, som anvender høj-effekt lysdioder, har det vist sig at termodynamik er yderst vigtig også at tage højde for. I dette projekt var det termodynamiske design udelukkende bygget på skøn, fordi der blev sat mere fokus på det elektriske og belysningstekniske i projektet. Selvom termodynamiske beregninger er ganske omfattende, er det absolut ikke noget som bør reduceres til skøn. Hverken i dette projekt, eller i andre lysdiode applikationer generelt.

Ved denne rapports afslutning (31/1-2005), endte det med at alle prototyperne anvendte den simplest mulige strømforsyning: en direkte ensretning af netspændingen til 325 VDC. En sådan strømforsyning er i princippet ikke ønskværdig på elnettet. Idet den virker som en stor kapacitiv belastning, og derfor har en meget dårlig effektfaktor. Det er derfor et must, at de kommende prototyper, skal have strømforsyninger med en acceptabel effektfaktor.

En fejl som blev begået under dette projektforsøg, var at basere valget af lysdioder, og beregningen af disses lystrømme, på baggrund af test af een enkelt diode af hver type. Fremfor at aflæse den typiske værdi i databladet for lysdioden. Grunden til at jeg valgte at teste dioderne, var at jeg ønskede et ensartet bedømmelsesgrundlag. Som sagt er der meget foreskel på hvad der er angivet i de forskellige datablade. Men i så fald burde jeg have testet ikke blot én af hver type, men måske 10 eller flere af hver type.

Projektet har krævet meget mere end de først antagede 550 timer, eller de 10 ECTS point (svarende til 8 timer pr. uge i 26 uger), som det gælder for i min uddannelse. Det er dog imidlertid ikke grunden til at projektet er blevet forsinket en mdr. Den større arbejds mængde har blot gjort at jeg har afsat

mere tid til projektet pr. uge, og især i sommerferien blev der arbejdet ekstra meget på det.

Grunden til at projektet alligevel blev forsinket en mdr. er derimod nogle forsinkede leveringer af de lysdioder som skulle bruges til konstruktion af prototyperne. Leverancerne gik upåklagelig hurtigt da der blot var tale om nogle få stk. til testen, men da der skulle bruges større partier til prototyperne, var det en helt anden sag.

Det arbejde, der især har taget lang tid, har været den manuelle konstruktion af prototyperne. Til dels lodningen af de mange hundrede lysdiode, som prototyperne består af. Men i lige så høj grad også bearbejdning af de mekaniske dele til prototyperne. Det er altid svært at vurdere hvor meget arbejde der skal lægges i et projekt før det påbegyndes, men en god regel må være, at det altid er mere end man regner med.

Dette PSO-støttede projekt har uden tvivl været til gavn for både opfindelsen, og jeg selv. Det er også min overbevisning at det vil være til gavn for fremtidige udviklingsprojekter vedr. lysdiode applikationer til belysning. Opfindelsen er blevet afprøvet i praksis, igennem egentlige prototyper, og der er blevet skabt interesse omkring den, i form af Schott Termofrost. Jeg selv har lært en hel del omkring udvikling af LED applikationer til belysning, og har fået endnu mere blod på tanden, dels til videreudvikling af denne opfindelse, men også til udvikling af andre LED applikationer.

Her til slut vil jeg gerne takke Jørn Borup Jensen fra ELFOR, for støtte og vejledning mht. det administrative i projektet. Poul Erik Pedersen fra Delta Lys og Optik for hjælp og vejledning mht. de belysningstekniske aspekter, samt for rabat ved test af de tre prototyper.

## Litteraturliste

<i>Colorimetry</i> Hunt, R. W. G.	CIE	1986
<i>Elektriske Lyskilder. Lys og Belysning</i> Kattler, Poul	Lysteknisk Selskab	1993
<i>Lys og belysning 2: Grundbegreber og målinger</i> Ovesen, Ib	Ashehoug	1967
<i>Lys og belysning 1: Lyset og synet</i> Ovesen, Ib og Viggo Dreyer	Ashehoug	1967
<i>Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources</i> Münch, W	CIE	1995
<i>Microelectronic Circuit</i> Sedra, A. S. Og K. C. Smith	Oxford University Press	1998

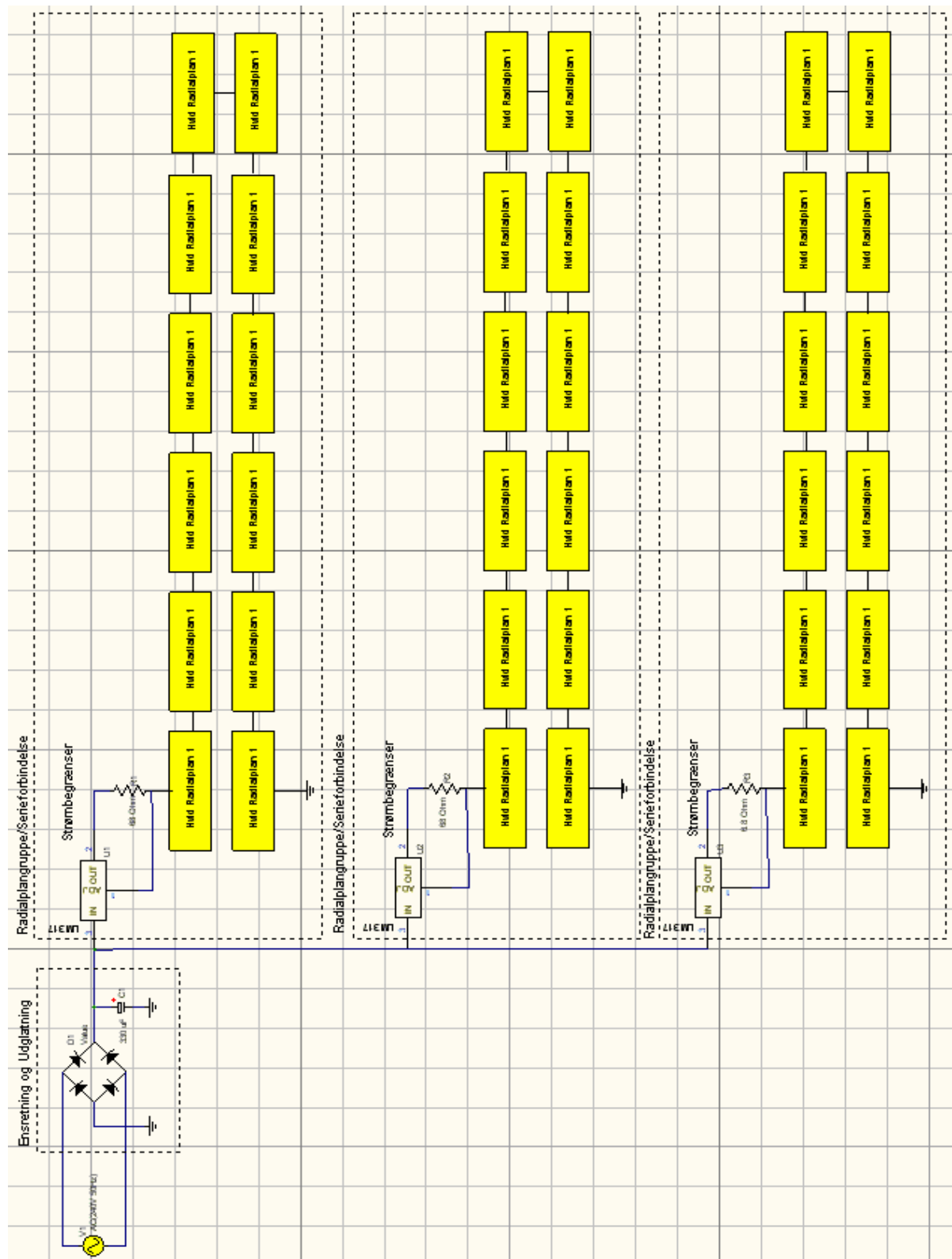
## Bilagsliste

Bilag 1:	Patentet
Bilag 2:	Testrapport fra Delta: Måling af lysstrøm fra diodelysrør
Bilag 3:	Testrapport fra Delta: Bestemmelse af den relative spektrale strålingsstyrke for diodelysrør
Bilag 4:	Rå testdata
Bilag 5:	CD-ROM med alt elektronisk materiale vedr. projektet
Bilag 6:	Afslutningsskema
Bilag 7:	Regnskab

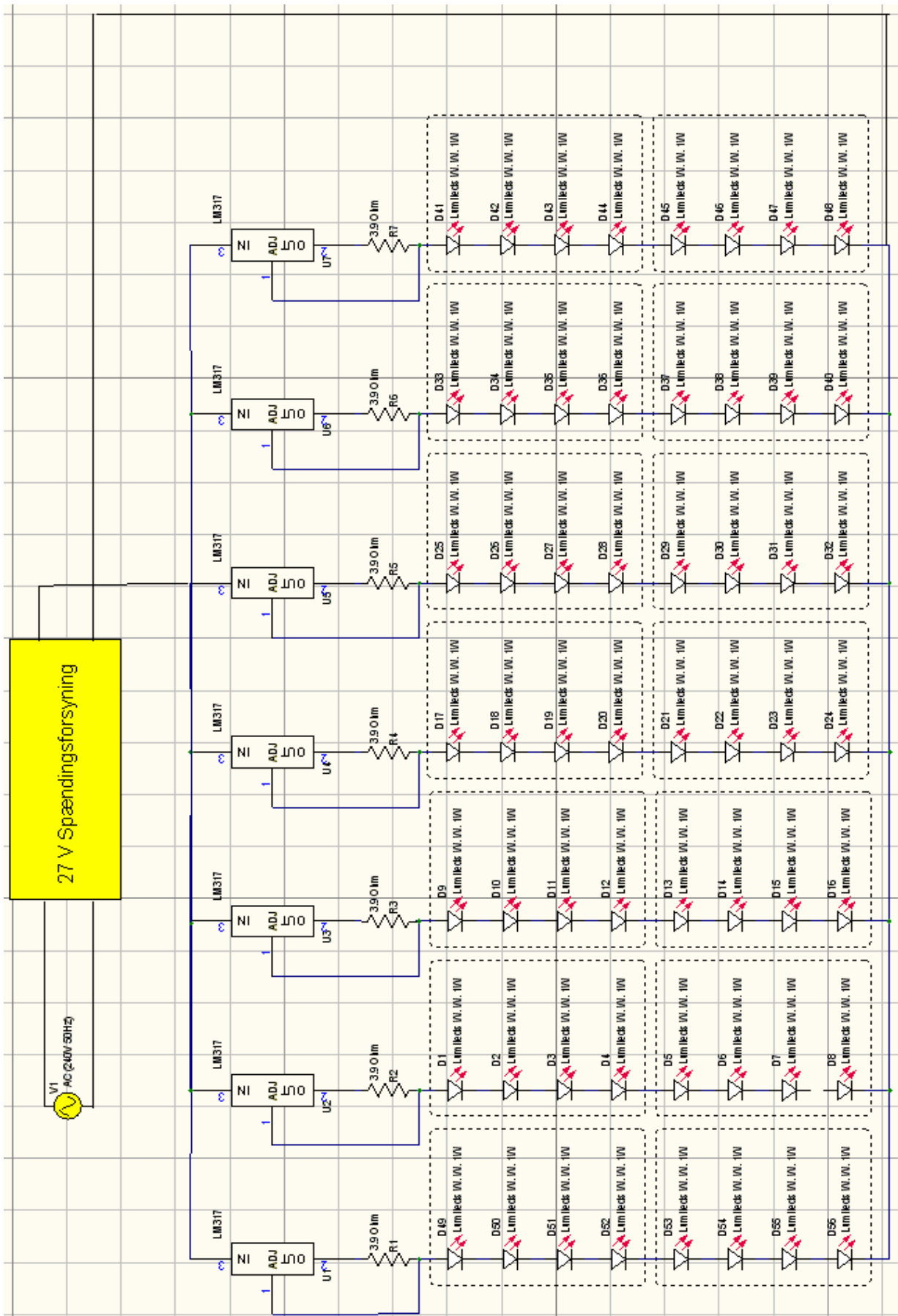


# Appendix

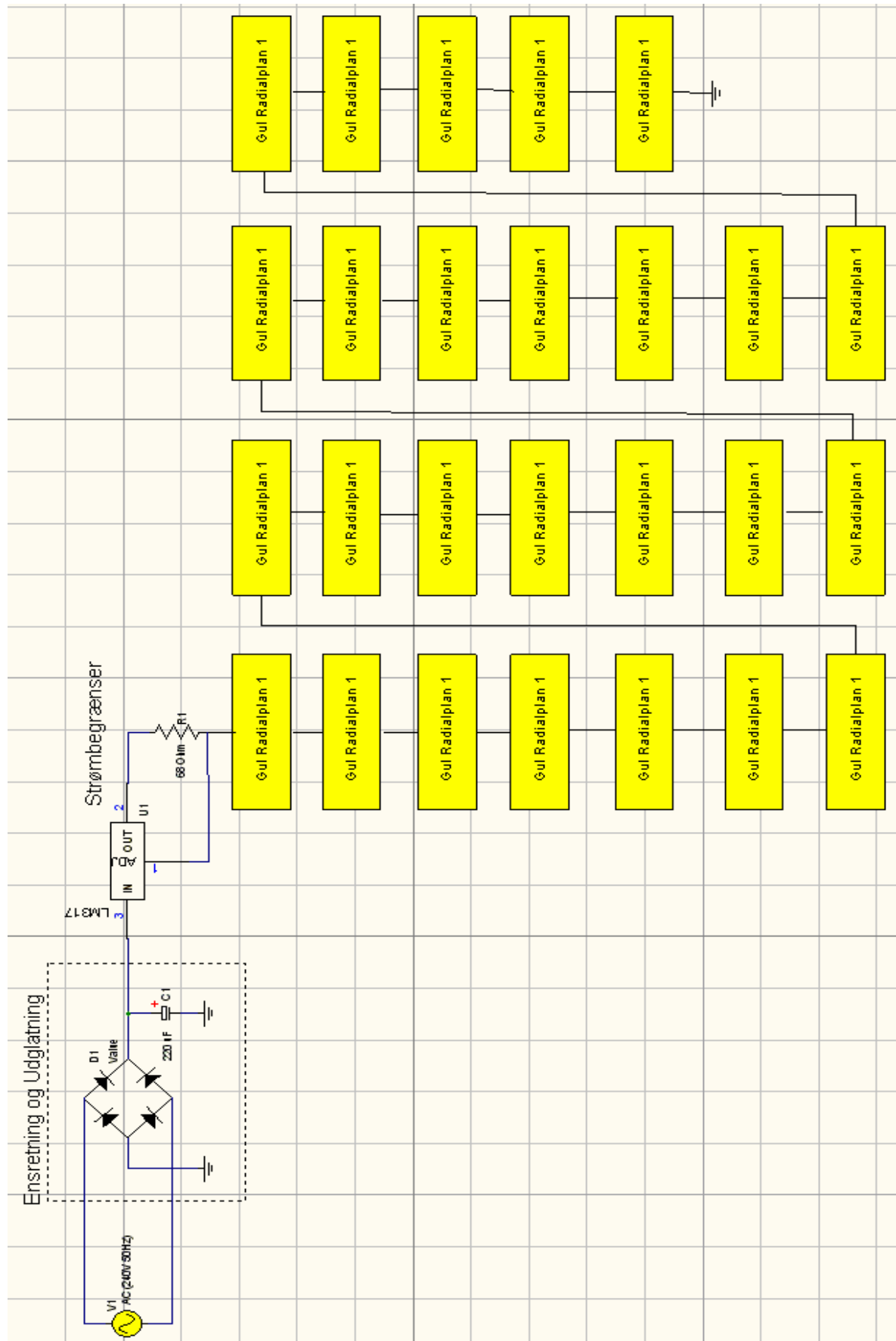
## Diagram for den hvide prototyp



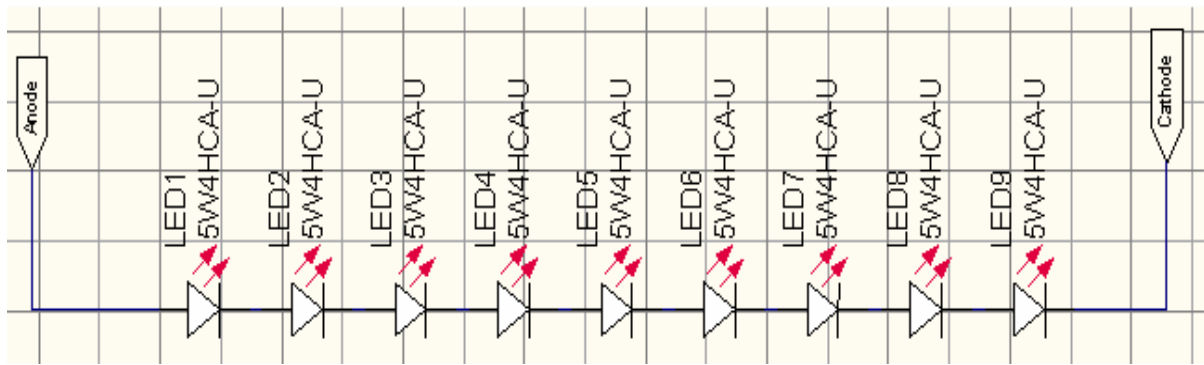
# Diagram for the warm white prototype



## Diagram for den gule prototype



### Diagram for radialplan til den hvide prototype



### Diagram for radialplan til den gule prototype

