

TECHNISCHE UNIVERSITEIT DELFT

Bachelor thesis

Het ontwerp van een optisch draadloos zendsysteem met
witte leds

Pieter De Buck & Pascal 't Hart

Delft, 14 juni 2011

Faculteit voor Elektrotechniek, Wiskunde en Informatica
Afdeling Elektrotechniek

Bachelor Afstudeer Project coördinator:

Dr.ing. I.E. Lager

Thesis begeleiders:

Dr.ir. G.J.T. Leus

Dr.ir. T.J.M. van Waterschoot

LEDSpeak

Pieter De Buck - 1347292

Pascal 't Hart - 1505203

Dejan Borota - 1527347

Stephen van 't Hof - 1511882

Bart Jansen - 1540580

Thijs Wensveen - 1505351



Voorwoord

Deze bachelorthesis behoort tot een rapport dat bestaat uit drie thesissen die samen een technisch verslag vormen van het Bachelor Eind Project (BEP) 'Communicatie via leds' aan de faculteit Elektrotechniek van de TU Delft.

Naast het rapport is over dit onderwerp ook een businessplan met ethische paragraaf geschreven. Het businessplan is een conceptplan voor een virtueel bedrijf dat met deze technologie een aantal producten op de markt wil brengen. De bedrijfsnaam is LEDSpeak en de technologie waarvan LEDSpeak gebruik maakt in haar producten, heet Data-Light Emitting Diode (D-LED). D-LED technologie integreert verlichting en communicatie van data, gebruikmakend van leds. Het eerste product dat vermarkt wordt, is LED-pricing, een product dat verkocht kan worden aan warenhuizen. LED-pricing bestaat uit een reeks van digitale prijskaartjes of *Smart Shelf Labels* (SSLs) die gevoed en aangestuurd worden op basis van de D-LED technologie.

Het rapport bespreekt uitvoerig de technische aspecten van de D-LED technologie in de toepassing van LED-pricing. De titels van de drie thesissen zijn:

- 'Het ontwerp van een optisch draadloos zendsysteem met witte leds'
- 'Vergelijking en implementatie van digitale signaalbewerkingstechnieken bij communicatie via leds'
- 'Het ontwerp van Smart Shelf Labels voor LEDSpeak'

Onze dank gaat uit naar:

Geert Leus en Toon van Waterschoot voor hun begeleiding van het project
Jaap Hoekstra voor het beschikbaar stellen van apparatuur en een werkruimte
Martin Schumacher voor het aanleveren van componenten en het geven van goede raad
Gerard Janssen voor het verhelderen van bepaalde modulatie technieken
Wouter Serdijn voor begeleiding bij het ontwerpproces
Robertus Schoevaars voor verheldering van hoogvermogensschakelingen
Xavier van Rijnsouwer en Sima Tarashioon voor het geven van advies

Delft, 14 juni 2011
Pieter De Buck
Pascal 't Hart

Samenvatting

Light Emitting Diodes hebben in het laatste decennium een efficiëntie, lichtvermogen en levensduur bereikt die het mogelijk maakt om in één toepassing, die gebruikt maakt van leds, verlichting en draadloze optische communicatie te combineren. Aan de hand van een analyse van deze huidige eigenschappen is onderzocht of het mogelijk is deze combinatie te integreren in de toepassing van LED-pricing.

Het concept bestaat uit een enkele zender, namelijk de verlichting van het warenhuis, die uniform en simultaan dezelfde informatie uitzendt, en meervoudige ontvangers, namelijk alle prijskaartjes die individueel informatie op het display afbeelden die uniek is per prijskaartje. Een centrale terminal bevat alle informatie die naar de prijskaartjes verzonden moet worden. Deze informatie moet, met een modulatietechniek die onzichtbaar is voor het menselijk oog, via de leds uitgezonden worden.

In deze thesis wordt de zenderkant van het systeem ontworpen, die bestaat uit een centrale terminal vanwaar de data worden verstuurd naar een *Power Line Carrier Modem* (PLCM) die de data superponeert op het lichtnet. Bij de aansluitklemmen van de verlichting worden de data met een tweede PLCM van het lichtnet gehaald en gebruikt om een elektronische schakeling aan te sturen die de ledverlichting van stroom voorziet.

Er is een gedetailleerd Programma van Eisen (PvE) opgesteld dat uitvoerig de voorwaarden vastlegt waaraan het ontwerp moet voldoen. In een systeemconcept wordt het ontwerp opgesplitst in deelfuncties die vervolgens afzonderlijk ontworpen worden.

Verder is er een *proof of principle* gebouwd voor het hele systeem met een transmissiedebiet van 10 kbit/s die twee afzonderlijke prijskaartjes over een afstand van 42cm kan aansturen. Deze bestaat uit een prototype dat de flow van data implementeert. Het prototype is opgebouwd uit een *Graphical User Interface* (GUI), een NXP 8051-microprocessor die een modulatietechniek implementeert, een transistorschakeling en een *off-the-shelf* ledverlichting. Het prototype gebruikt twee ontvangers die het principe van meervoudige ontvangers illustreren. Meerdere zenders kunnen gebruikt worden en de bijhorende interferentie kan onderzocht worden.

Het hele ontwerpproces toont aan dat correcte overdracht van informatie met een enkele zender en meervoudige ontvangers mogelijk is bij digitale prijskaartjes. Er is 6 kbit/s nodig voor het verzenden van alle informatie naar 65536 digitale prijskaartjes binnen een tijdspanne van 1 uur.

Inhoudsopgave

Voorwoord	ii
Samenvatting	iv
1 Inleiding	1
2 Probleemanalyse	2
2.1 Vaststelling van het probleem	2
2.2 Specificaties voor het systeem	3
2.3 Programma van Eisen	4
2.3.1 Eisen met betrekking tot het beoogd gebruik	4
2.3.2 Eisen met betrekking tot de ecologische situering van het systeem	5
2.3.3 Eisen met betrekking tot de productie en ingebruikstelling	5
2.3.4 Eisen met betrekking tot de liquidatie van het systeem	7
2.3.5 Eisen met betrekking tot bedrijfsstrategie, marketing en verkoop	7
2.4 Verwant onderzoek	7
2.4.1 Visible Light Communication	8
2.4.2 Witte leds	10
2.4.3 Power Line Communication	12
3 Concept voor het ontwerp	14
3.1 Topologie van het systeem	14
3.2 Deelfuncties van het systeem	16
3.3 Orthogonaliteit, prioriteit en functieblokdigrammen	16
3.3.1 User interface	17
3.3.2 Link	19
3.3.3 PLCM	21
3.3.4 Verificatie	23
3.3.5 Modulatie	25
3.3.6 Aansturing	27
3.3.7 Led verlichting	29
4 Ontwerp van het systeem	31
4.1 Ontwerp van de user interface	31
4.2 Ontwerp van de link	32
4.3 Ontwerp van de PLCM	33
4.4 Ontwerp van de verificatie	34
4.5 Ontwerp van de modulatie	34

4.6	Ontwerp van de aansturing	35
4.7	Ontwerp van de ledverlichting	37
5	Proof of Principle	40
5.1	Implementatie van de user interface	40
5.2	Implementatie van de link	41
5.3	Implementatie van de PLCM	42
5.4	Implementatie van de verificatie	43
5.5	Implementatie van de modulatie	43
5.6	Implementatie van de aansturing	44
5.7	Implementatie van de ledverlichting	45
6	Evaluatie van Proof of Principle	47
6.1	Prestatie Proof of Principle	47
6.2	Overstap naar Proof of Concept	48
7	Conclusie en aanbevelingen	50
	Lijst van figuren	51
	Lijst van tabellen	52
	Lijst van veel gebruikte termen	53
	Appendices	59
	A assembler code	59
	B MatLab code	64
	C Gantt/PERT chart	68

Hoofdstuk 1

Inleiding

Witte leds zijn een functioneel alternatief voor hedendaagse verlichting. De voordelen die ze met zich meebrengen zijn een laag energieverbruik, een langere *Mean Time To Failure* (MTTF), kleine afmetingen en een hoge efficiëntie. Witte leds worden algemeen op drie verschillende manieren vervaardigd. Er zijn RGB-leds, *near-UV*-leds die licht uitstralen gebruikmakend van fluorescentie, en blauwe leds met een gele fosforcoating [1]. Dit laatste type wordt commercieel het meest toegepast en heeft een efficiëntie die ligt tussen die van RGB-leds en *near-UV*-leds. Omdat leds steeds vaker als lichtbron toegepast worden en er reeds optische draadloze communicatie via infrarood (IR) licht bestaat, is geopperd om verlichting en datacommunicatie te integreren, gebruikmakend van witte leds. Recent onderzoek brengt voorstellen van 10 Gb/s voor communicatie met witte leds [2]. De facto wordt er informatie verzonden via de leds die onzichtbaar is voor het menselijk oog.

LED-pricing is een toepassing die gebaseerd is op dit principe. Het is een digitaal prijskaartsysteem dat geïmplementeerd kan worden in warenhuizen en waarin prijzen doorgestuurd worden naar de prijskaartjes via ledverlichting. Hierbij komt als extra factor dat het licht van de witte leds als energiebron gebruikt wordt om de elektronica van het digitale prijskaartje aan te sturen.

In dit rapport wordt de volgende vraagstelling behandeld:

Hoe moet een optisch draadloos communicatieprotocol voor de toepassing van LED-pricing ontworpen worden, zodat witte leds gebruikt kunnen worden? Welke vereisten en randvoorwaarden worden hiervoor gesteld aan de zenderkant van het communicatieprotocol?

Deze thesis beschrijft het ontwerpproces van de zenderkant van het LED-pricing systeem. Op basis van verwant onderzoek, een uitgebreid ontwerpproces en een *proof of principle* wordt aangetoond hoe communicatie via leds mogelijk is voor de toepassing van LED-pricing.

De structuur van de thesis is opgebouwd rond een frame van 7 hoofdstukken. In hoofdstuk 2 wordt een probleemanalyse uitgevoerd en vervolgens een gedetailleerd Programma van Eisen (PvE) opgesteld. De hoofdstukken 3 en 4 beschrijven het eigenlijke systeemontwerp van LED-pricing. Hierin wordt het hele systeem opgesplitst tot een reeks van deelproblemen die op het laagste niveau opgelost worden. Hoofdstuk 5 behandelt de implementatie van een *proof of principle* voor LED-pricing dat nadien in hoofdstuk 6 geëvalueerd wordt. Hoofdstuk 7 geeft een aantal conclusies over het ontwerpproces en aanbevelingen voor verdere ontwikkeling.

Hoofdstuk 2

Probleemanalyse

In paragraaf 2.1 wordt de hoofdvraag van deze thesis geanalyseerd. Paragraaf 2.2 somt de specificaties op voor het systeem en het PvE wordt opgesteld in paragraaf 2.3. In de laatste paragraaf wordt verwant onderzoek aangehaald dat aan de basis ligt van deze toepassing. Hierin worden respectievelijk aspecten van *Visible Light Communication* (VLC), witte leds en *Power Line Communication* (PLC) besproken.

2.1 Vaststelling van het probleem

Digitale prijskaartjes zijn een opkomend fenomeen. Huidige implementaties zijn reeds goedkoop, werken op batterijen en worden via draadloze communicatie zoals radio frequency (RF) aangestuurd vanuit een centrale database. Recente ontwikkelingen in halfgeleidertechnologie zorgen voor grote vooruitgang in de ontwikkeling van leds als verlichting in openbare en industriële ruimtes. Met op de achtergrond dat communicatie via IR-leds al decennia lang mogelijk is, en de nieuwe opportuniteit om leds ook als verlichting te gebruiken, rijst de vraag of dit geïntegreerd kan worden in een toepassing voor digitale prijskaartjes.

De vraagstelling uit de inleiding is de kern van de probleemstelling. Deze valt uiteen in een aantal aspecten die de basis vormen voor het opstellen van een gedetailleerd PvE. Onderstaande tekst geeft een beschrijving van het product LED-pricing zoals die in een voorstudie aan bod kan komen.

Het systeem bestaat uit een aantal led-buizen die informatie naar alle prijskaartjes in de winkel sturen. Hierop moeten prijs, prijs per eenheid en de productnaam afgebeeld kunnen worden. De data die verzonden moeten worden naar de prijskaartjes komen uit een database. Vanuit een centraal punt moeten deze data verstuurd kunnen worden naar alle digitale prijskaartjes. Die data worden vanuit de verlichting in het plafond van warenhuis verstuurd naar alle prijskaartjes die op de rekken aanwezig zijn. Hieruit volgt dat correcte optische transmissie mogelijk moet zijn over de grootst mogelijke afstand die voorkomt tussen een prijskaartje en de aanwezige verlichting. Het systeem moet robuust zijn ten aanzien van daglicht, zodat ook in de buurt van in- en uitgangen van het warenhuis correcte overdracht kan plaatsvinden. De overdracht van data mag niet waargenomen worden door het menselijke oog en wanneer er geen overdracht is, moet het licht op een normale manier branden.

Met minimale ingrepen aan de infrastructuur van een warenhuis moet het systeem geïnstalleerd

kunnen worden. Dit houdt in dat led-buizen compatibel moeten zijn met TL-buizen, en dat er zo weinig mogelijk nieuwe infrastructuur aangelegd moet worden. Communicatie van data over het lichtnet zorgt hier voor een oplossing.

Alle prijskaartjes moeten binnen afzienbare tijdspanne geupdated kunnen worden, en een prijskaartje moet zijn informatie tijdelijk op het display houden als de fotogevoelige cel afgedekt is. Omwille van het grote aantal prijskaartjes moet de gebruiker enkel terugkoppeling krijgen wanneer informatie niet goed verzonden is. Het systeem tracht met minimale interventie van de gebruiker een zo correct mogelijke overdracht van data uit te voeren. Er moet een verknipper zijn op het prijskaartje die aantoont wanneer er een foute overdracht heeft plaatsgevonden, en er moet terugkoppeling zijn naar de gebruiker als data niet verstuurd kunnen worden. Naast een centrale aansturing moet de gebruiker ook individuele prijskaartjes kunnen aansturen. Hiervoor is een *user interface* nodig die door een warenhuismanager bediend moet kunnen worden. Deze interface is de enige schakel in het systeem waar de gebruiker input kan geven. Het product moet bovendien gebruiksvriendelijk zijn.

2.2 Specificaties voor het systeem

De lijst van specificaties in deze paragraaf is een opsomming zoals die van een klant aan een producent gevraagd kunnen worden tijdens het voorontwerp van een product. De beoogde lijst voor een LED-pricing systeem ziet er als volgt uit. Het systeem:

- verlicht de ruimte voldoende
- bestaat uit digitale prijskaartjes waarvan alle elektronica wordt aangestuurd door energie van het licht
- kan centraal aangestuurd worden
- is gebruiksvriendelijk
- kan omgaan met interferentie van daglicht
- is in totaliteit energiezuiniger dan een TL - verlichtingssysteem
- is gemakkelijk implementeerbaar vanaf huidige systemen
- verzendt data die onzichtbaar gemoduleerd zijn voor het blote oog
- is een *end-to-end* product (compleet systeem)
- bestaat aan de zenderkant uit een reeks led-buizen
- bestaat aan de ontvangerkant uit een reeks digitale prijskaartjes die data en energie ontvangen via een foto-voltaïsche cel.
- bestaat aan de ontvangerkant uit een reeks digitale prijskaartjes die prijs, prijs per eenheid en productnaam kunnen afbeelden.

De opdeling van eisen aan het systeem die hieruit volgt, is analoog aan de levenscyclus van het product, opdat een integraal PvE verkregen zou worden.

2.3 Programma van Eisen

Er wordt onderscheid gemaakt tussen vijf grote categorieën eisen. Duurzaamheid is één van de twee aspecten die LEDSpeak als bedrijf hoog in het vaandel voert. Elke release van een nieuw product moet gekoppeld zijn aan een maatschappelijke waarde of aan een respons op een evolutie binnen de maatschappij. LED-pricing maakt op een multifunctionele manier gebruik van licht. De energie die het digitale prijskaartje nodig heeft, komt uit een foto-voltaïsche cel die belicht wordt door leds die ook data verzenden en de ruimte van artificieel licht voorzien. Daaruit volgt dat harde randvoorwaarden gesteld worden met betrekking tot de functionele eisen. De verkoopaspecten en veiligheidsfacetten van LED-pricing worden uitvoerig beschreven in het businessplan van LEDSpeak [3].

2.3.1 Eisen met betrekking tot het beoogd gebruik

- (2.3.1.1) Het systeem moet evenveel lichtopbrengst hebben als de huidige verlichting in een warenhuis.
- (2.3.1.2) Het verzenden van de data via de witte leds gebeurt op een onzichtbare manier voor het blote oog.
- (2.3.1.3) Als er een fout optreedt tijdens het verzenden van de data mag het licht in de ruimte niet uitgaan.
- (2.3.1.4) Het licht van de leds moet genoeg energie bevatten om alle digitale prijskaartjes van energie te voorzien.
- (2.3.1.5) Elk individueel prijskaartje moet genoeg licht kunnen ontvangen om zichzelf van voldoende energie te voorzien die alle elektronica moet voeden.
- (2.3.1.6) Als het licht op een prijskaartje wegvalt, moet het kaartje in staat zijn minstens twaalf uur lang z'n informatie op het display te houden.
- (2.3.1.7) Alle informatie die op het display moet verschijnen, wordt via het licht verzonden.
- (2.3.1.8) De productnaam, prijs en prijs per eenheid moeten kunnen afgebeeld worden op het display.
- (2.3.1.9) De totale hoeveelheid data moet verzonden kunnen worden over de beschikbare verlichting in een tijdsperiode van één uur.
- (2.3.1.10) Vanuit één centrale PC moeten alle prijskaartjes voor één warenhuis aangestuurd kunnen worden.
- (2.3.1.11) Prijskaartjes moeten individueel en onafhankelijk aangestuurd kunnen worden.
- (2.3.1.12) Het systeem moet te bedienen zijn door een warenhuismanager.
- (2.3.1.13) De optische overdracht moet robuust zijn ten aanzien van interferentie met daglicht.
- (2.3.1.14) Het systeem moet gemakkelijk te integreren zijn in een huidige winkelinfrastructuur.

- (2.3.1.15) Het LED-pricing systeem is een end-to-end systeem. Het is een sluitend pakket dat reikt van software op de centrale PC tot en met de installatie van het prijskaartje.
- (2.3.1.16) Er mag geen foutieve informatie afgebeeld worden op het prijskaartje.
- (2.2.1.17) Het LED-pricing systeem moet toegepast kunnen worden in de koelafdeling van een warenhuis.
- (2.2.1.18) De persoon die prijskaartjes moet invoeren wordt gewaarschuwd wanneer een ongeldig ID of ongeldige informatie voor het display wordt ingevuld.
- (2.3.1.19) De consument wordt gewaarschuwd als er ongeldige informatie op het display afgebeeld wordt.

2.3.2 Eisen met betrekking tot de ecologische situering van het systeem

- (2.3.2.1) De lichtintensiteit uit de witte leds valt binnen klasse 1 van de EN.
- (2.3.2.2) Alle materialen zijn RoHS-compliant.
- (2.3.2.3) LED-pricing moet voldoen aan internationale voorschriften van veiligheid en gezondheid.
- (2.3.2.4) Bij defect moet het mogelijk zijn om het betreffende onderdeel in het hele systeem te vervangen. Hiervoor wordt het LED-pricing systeem modulair opgebouwd.
- (2.3.2.5) Het systeem is in het geheel energiezuiniger dan een equivalente opstelling met TL-verlichting.
- (2.3.2.6) Het productieproces moet zo weinig mogelijk belastend zijn voor het milieu.

2.3.3 Eisen met betrekking tot de productie en ingebruikstelling

- (2.3.3.1) De verlichtingsmodule bestaat uit buizen gevuld met witte leds, compatibel met de vorm van een TL-buis en moeten geleverd kunnen worden in alle standaardafmetingen waarin ook TL-buizen beschikbaar zijn.
- (2.3.3.2) De elektronica die nodig is voor het verzenden van de data moet geïntegreerd worden in de led-buis.
- (2.3.3.3) De aansluitpunten van de led-buizen werken op 230V AC, 50 - 60Hz.
- (2.3.3.4) Alle prijskaartjes worden geleverd met montagesysteem.
- (2.3.3.5) Bij het verzenden van data moet de gemiddelde lichtopbrengst in een warenhuis gelijk zijn aan die voor LED-pricing geïnstalleerd is, of voldoen aan de normen die gelden binnen warenhuizen.
- (2.3.3.6) Alle elektronica van het digitale prijskaartje wordt gevoed met stroom afkomstig van een zonnecel die op het prijskaartje aanwezig is.

- (2.3.3.7) Het prijskaartje is conform aan afmetingen van gelijkwaardige digitale varianten.
- (2.3.3.8) Het display van elk prijskaartje bevat 2 rijen van 16 ASCII karakters.
- (2.3.3.9) De communicatie met het prijskaartje is uni-directioneel.
- (2.3.3.10) Data worden verzonden met controlebits en een header.
- (2.3.3.11) Alle data worden verzonden door alle aanwezige led-buizen.
- (2.3.3.12) Een prijskaartje kan alleen de data op het display afbeelden die voor hem bestemd is.
- (2.3.3.13) Bij het starten van verzenden kan een centrale database in één keer gesynchroniseerd worden met alle prijskaartjes.
- (2.3.3.14) De software van het systeem op de centrale terminal moet compatibel zijn met Windows en Linux systemen.
- (2.3.3.15) Het datasignaal wordt vanaf de centrale terminal via 'power line communication' naar de led-buizen verstuurd.
- (2.3.3.16) Het onderhoud van het systeem is beperkt tot het vervangen van prijskaartjes en led-buizen.
- (2.3.3.17) Het signaal van de terminal naar de power line carrier modem voldoet aan de eisen van een gestandaardiseerd kanaal met voldoende capaciteit.
- (2.3.3.18) De werking van de software op de centrale terminal moet duidelijk zijn voor de gebruiker, maar algoritmes zijn afgeschermd.
- (2.3.3.19) Prijskaartjes moeten manueel aangepast kunnen worden.
- (2.3.3.20) Een prijskaartje moet uit de database kunnen opgezocht worden. Bij het invullen van een ID moet de verzonden informatie opgevraagd kunnen worden.
- (2.3.3.21) De data die via de *Powerline Carrier Modem* (PLCM) verstuurd wordt mag niet interfereren met andere signalen zoals communicatie tussen rookmelders die ook over het lichtnet communiceren.
- (2.3.3.22) Als de led-buizen geen data verzenden, zijn ze in een niet-communicatieve toestand waarbij het licht normaal brandt.
- (2.3.3.23) Indien een fout optreedt in de firmware van de led-buizen, wordt de buis gereset.
- (2.3.3.24) Als een led-buis niet goed functioneert, wordt dit teruggekoppeld naar de centrale terminal.
- (2.3.3.25) De software op de centrale terminal bevat de interface van LED-pricing voor de gebruiker.
- (2.3.3.26) De kwaliteits-prijsverhouding moet minstens even groot zijn als die van alternatieve digitale prijskaartsystemen.
- (2.3.3.27) De interface moet beschikbaar zijn in alle officiële talen die binnen de Europese Unie gesproken worden.

- (2.3.3.28) Er moet communicatie mogelijk zijn die interferentie van daglicht kan weerstaan die kleiner is dan 300 lux (gemiddelde lichtsterkte van indirect licht in een kantoor).
- (2.3.3.29) Het systeem moet geïnstalleerd worden door een technisch bevoegd persoon.
- (2.2.3.30) De minimum afstand waarover correcte transmissie moet plaatsvinden is de grootste afstand tussen een SSL en de meest nabije led-buis.
- (2.2.3.31) Het systeem moet robuust zijn ten aanzien van het klimaat in de koelafdeling van een warehouse.
- (2.2.3.32) Alle communicatie vindt simultaan plaats door alle geïnstalleerde LED-pricing verlichting.

2.3.4 Eisen met betrekking tot de liquidatie van het systeem

- (2.3.4.1) Het systeem moet verwijderbaar zijn.
- (2.3.4.2) Het afvalverwerkingsproces moet zo weinig mogelijk belastend zijn voor het milieu.
- (2.3.4.3) Het systeem is na afvloeiing bruikbaar als normale winkelverlichting.
- (2.3.4.4) Het systeem kan teruggeleverd worden aan ledspeak.
- (2.3.4.5) Als batterijen gebruikt worden in het ontwerp dan moeten die gemakkelijk verwijderbaar zijn.

2.3.5 Eisen met betrekking tot bedrijfsstrategische, marketing- en verkooptechnische aspecten

- (2.3.5.1) Een LED-pricing systeem is gemaakt voor een maximum aantal prijskaartjes. Bij uitbreiding van het aantal prijskaartjes moet een nieuw systeem aangekocht worden.
- (2.3.5.2) LEDSpeak heeft een afzetmarkt in een *business-to-business*-model. LED-pricing zal ook volgens dit model verkocht worden.

2.4 Verwant onderzoek

In deze paragraaf wordt een samenvatting gegeven van verwant onderzoek. Er wordt literatuur aangehaald over aspecten van VLC, witte leds en PLC die relevant zijn met betrekking tot het ontwerp van het LED-pricing systeem. In dit verwant onderzoek staat beschreven wat de *state of the art* maatstaven zijn met betrekking tot communicatie via leds. Deze huidige specificaties vormen een uitgangspunt tijdens het systeemontwerp in hoofdstuk 3 en 4.

In paragraaf 2.4.1 worden aspecten met betrekking tot communicatie over een optisch kanaal besproken. Paragraaf 2.4.2 behandelt recente ontwikkelingen met betrekking tot de productie van witte leds, en paragraaf 2.4.3 bespreekt de technische aspecten van PLC.

2.4.1 Visible Light Communication

De lichtsterkte van een led wordt als volgt uitgedrukt:

$$I(\phi) = I(0) \cos^m(\phi). \quad (2.1)$$

Horizontale lichtsterkte in het vlak loodrecht op de normaal van de lichtbron wordt uitgedrukt door:

$$I_{hor} = \frac{I(0) \cos^m(\phi) \cos(\psi)}{D_d^2}. \quad (2.2)$$

Hierin is $I(0)$ de lichtsterkte in het centrum van de lichtbundel, ϕ de stralingshoek, ψ de invalshoek, m het getal dat de lobe van de uitstraling aanduidt (Lambertiaanse emissie) en D_d de afstand tussen de led en het oppervlak van een detector.

DC-versterking in een optisch kanaal kan als volgt beschreven worden [4], [5],[6]:

$$H(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi D_d^2} \cos^m(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi), & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0, & \psi \geq \Psi_c. \end{cases} \quad (2.3)$$

Hierin is $T_s(\psi)$ de versterking van het optisch filter in de detector, $g(\psi)$ de versterking door de lens van de detector en A de oppervlakte van de detector. Ψ_c duidt de grootte van de hoekselectiviteit aan.

Het ontvangen optisch vermogen P_r wordt:

$$P_r = \sum_{m=0}^{\infty} P_{rm}, \quad (2.4)$$

waarin P_r het ontvangen vermogen is en m het aantal reflecties. Het ontvangen vermogen is een oneindige som van vermogens uit alle mogelijke reflecties. In een veel toegepaste testopstelling blijkt dat het vermogen uit de eerste reflectie nog slechts 0.5dB toevoegt aan het vermogen uit de *line of sight* (LOS) ontvangst [5]. Het vermogen ontvangen uit LOS hangt af van n leds die een bijdrage leveren:

$$P_r = \sum_{i=1}^n P_{ti} H_i(0). \quad (2.5)$$

Signaalverlies door *multipath fading* kan verwaarloosd worden om dat de data verstuurd wordt via een lichtgolf met frequentie 10^{14} Hz met golflengtes tussen 380 en 780 nm. De afmetingen van een detector zijn van die grootte dat ze zorgen voor *spatial diversity* en bijgevolg *multipath fading* tegengaan [2],[7].

Het ontvangen elektrisch signaal $Y(t)$ kan uitgedrukt worden als een convolutie van de impulsresponsie $h(t)$ van het optisch kanaal en het uitgezonden optisch signaal $X(t)$:

$$Y(t) = \eta X(t) * h(t) + N(t), \quad (2.6)$$

waarin η de efficiëntiefactor is die de optisch-elektrische omzetting van de detector weergeeft [5],[2],[6]. $N(t)$ bestaat uit Aditieve Witte Gaussische Ruis (AWGR) en hagelruis die ongecorrleerd zijn met elkaar, $\sigma_{totaal}^2 = \sigma_{AWGR}^2 + \sigma_{hagel}^2$. Omdat licht opgebouwd is uit discrete deeltjes, wordt dit in de vergelijking apart opgenomen, omdat deze vorm van ruis dominant is in situaties met een beperkt aantal deeltjes. In situaties met veel daglicht gedraagt de hagelruis zich

als tijdsinvariant en kan alle ruis bij benadering vervangen worden door een vorm van AWGR [7]. In situaties met weinig daglicht is de overheersende bron van ruis de voorversterker in het detectorcircuit.

Onderzoek naar datasnelheden in VLC variëren van 100 kbit/s [8],[9] tot voorstellen van 10 Gbit/s [2]. Wanneer gebruik gemaakt wordt van meervoudige lichtbronnen ontstaat *Inter Symbol Interference* (ISI) door padlengteverschillen. Een *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) kan de kwaliteit van een transmissie uitdrukken en bepaalt rechtstreeks de *Bit Error Rate* (BER). Een stabiele link wordt vaak geschat op een BER van 10^{-6} [4],[5],[7]. Het signaalvermogen wordt gedefinieerd als:

$$P_{rSignal} = \int_0^T \left(\sum_{i=1}^n h_i(t) * X(t) \right)^2 dt. \quad (2.7)$$

Ruisvermogen door ISI wordt gedefinieerd door het vermogen van het signaal dat buiten de symbooltijd verzonden wordt, maar binnen de symbooltijd ontvangen wordt:

$$P_{rISI} = \int_T^\infty \left(\sum_{i=1}^n h_i(t) * X(t) \right)^2 dt, \quad (2.8)$$

waarin n het aantal leds is [2]. ISI is de meest dominante factor in het ruisvermogen tot datasnelheden van 20 Gbit/s [2]. Dit hangt sterk af van de dimensies van de ruimte en de layout van de leds in de opstelling die gebruikt wordt. Bij frequenties lager dan 100 kbit/s gaan ook daglicht en hagelruis van het led-licht een bijdrage leveren aan het ruisvermogen. ISI door padlengteverschillen kan gecompenseerd worden met het toepassen van optische *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM). In een vergelijkende studie waarin de BER van *On-Off Keying Return-to-Zero* (OOK-RZ) en modulatie door middel van optische OFDM tegen elkaar worden afgewogen, blijkt de winst met gebruik van OFDM bij dezelfde SNR aan de uitgang van het detectorcircuit [10].

Een tweede aspect dat een bijdrage levert aan het ruisvermogen is het *Field Of View* (FOV) van de detector. De transmitter heeft een zo groot mogelijke ruimtehoek omdat die ook als verlichting van de ruimte functioneert. Een nauwe hoekselectiviteit van de detector reduceert ISI en vergroot daarmee de mogelijkheid tot grotere datasnelheden. Hiertegenover staat dat er wel ten minste met 1 lichtbron LOS moet zijn om transmissie mogelijk te maken. De FOV kan bijgevolg afgesteld worden zodat een BER van bijvoorbeeld 10^{-6} aan de uitgang van het detectorcircuit bereikt wordt. Verder kan het ontvangen signaalvermogen vergroot worden door de layout te optimaliseren van de verlichting [11]. In situaties waar de eigenschappen van het transmissiekanal veranderen door schaduweffecten is een voorstel gedaan om met adaptieve equalisatie het signaalvermogen aan de ontvanger te vergroten [4]. Met een geoptimaliseerde trainingset wordt *channel estimation* uitgevoerd, en met behulp van een *pre-emphasis* filter aan de zenderkant wordt getracht de SNR te verhogen.

In het geval dat meerdere kanalen verschillende informatie uitsturen kan *Code Division Multiple Access* (CDMA) toegepast worden met Walsh-Hadamard coderingen, zodat volledige orthogonaliteit bestaat tussen de kanalen [12].

In [2] worden formule (2.7) en (2.8) respectievelijk uitgedrukt als: $P_{rSignal} = \int_0^T \left(\sum_{i=1}^n h_i(t) * X(t) \right) dt$ en $P_{rISI} = \int_T^\infty \left(\sum_{i=1}^n h_i(t) * X(t) \right) dt$. Volgens de auteurs van deze thesis wordt een vermogen uitgedrukt als een functie van het kwadraat van de amplitude van een signaal.

2.4.2 Witte leds

De formule (2.1) die de lichtsterkte van een LED uitdrukt, houdt nog geen rekening met de bandbreedte van het uitgezonden licht. Om de lichtsterkte uit te drukken als functie van de uitgezonden golflengte wordt de formule als volgt aangepast:

$$I(\phi, \lambda) = I(0) \cos^m(\phi) S_\lambda, \quad (2.9)$$

waarin S_λ de lichtsterkte uitdrukt afhankelijk van de golflengte. De functie kan benaderd worden als een gaussische verdeling, zoals afgebeeld in Fig. 2.1. De lichtsterkte wordt vervolgens:

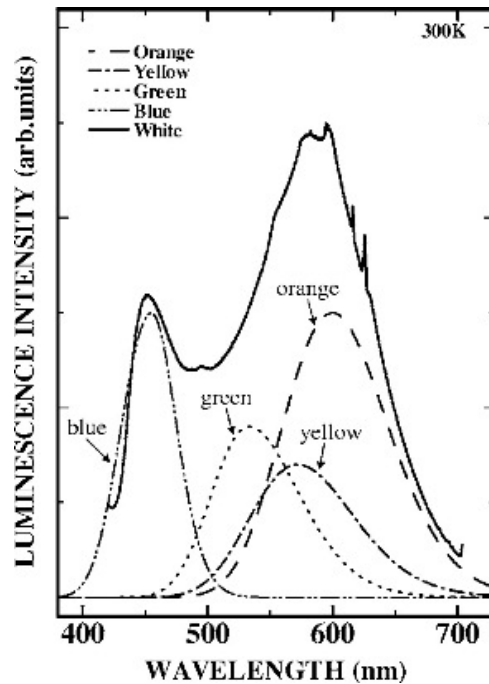
$$I(\phi, \lambda) = I(0) \cos^m(\phi) \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_p} \right)^2 \right], \quad (2.10)$$

waarin σ de variantie en λ_p de piekwaarde van de uitgestuurde golflengte is [1].

De efficiëntie η van leds wordt uitgedrukt als de verhouding van de totale lichtflux F_v en het totale vermogen P_l , gedissipeerd door de LED en de mogelijke ballast die de stroom door de LED begrenst:

$$\eta = \frac{F_v}{P_l} = \frac{K_m \int_{380}^{780} P_\lambda V(\lambda) d\lambda}{P_l}. \quad (2.11)$$

Een vermogen in lumen is steeds gerelateerd aan perceptie door het oog. Een uitgestraald elektromagnetisch vermogen komt overeen met een optisch vermogen in lumen dat frequentieafhankelijk is. K_m is de coëfficiënt voor de omzetting van het elektromagnetische naar het optische domein. P_λ is de spectrale elektromagnetische flux, $V(\lambda)$ is de functie die spectrale optische efficiëntie van het zichtbaar licht beschrijft [1].



Figuur 2.1: Luminantie spectrum van een typische witte OYGB led [13]

Er zijn drie gangbare methodes waarop witte leds tegenwoordig geproduceerd worden:

- Een RGB-led die drie afzonderlijke kanalen heeft voor een rode, groene en blauwe led-chip respectievelijk gebaseerd op AlGaAs of AlGaInP/GaAs, GaP en InGaN.
- Een blauwe led waarvan de chip afgedekt is met een laag geel fosfor. Deze methode wordt tot op heden het meest toegepast [14].
- Een *near-UV*-led die afgedekt is met drie verschillende lagen fosfor : aardalkali sulfide (rood), aardalkali *thiogallate* (groen) en BaMgAl₁₀O₁₇ (blauw), die alledrie met Europium gedoteerd zijn.

De samenstelling van het uitgezonden spectrum van RGB-leds is gevoelig voor temperatuurschommelingen, en vereist een elektronische aansturing met regeltechniek voor stabiele werking [15].

Een studie uit 2007 toont aan dat witte leds met fosforcoatings ver boven de efficiëntie van TL-verlichting ($\approx 90\text{Lm/W}$) uitsteken ($\approx 160\text{Lm/W}$) [16]. Hierin wordt rendement van witte leds geoptimaliseerd, door het verlagen van de doorlaatspanning V_f van de leds. Twee methodes worden hiervoor toegepast:

- Tijdens de epitaxiale groei van de wafers wordt de nadruk gelegd op een lagere V_f .
- Er worden grotere electrodes gebruikt die de stroomdichtheid verlagen.

Ook de *Phosphor Conversion Efficiency* (PCE) van fosforcoatings kan nog hoger. Op die manier kan de efficiëntie van witte leds nog groter gemaakt worden [1]. De kwaliteit van witte leds die gebruik maken van fosforcoatings hangt af van de dikte, de uniformiteit en de dichtheid van de fosforlaag. Een voorstel tot het optimaliseren van productieproces voor het aanbrengen van de coating wordt gedaan in [17].

De golflengte van blauwe leds kan kleiner gemaakt worden tot *near-UV* golflengtes, waarbij een blauwe fosforcoating zorgt voor witte luminantie. De verschuiving naar *near-UV* zou voor een grotere efficiëntie van witte leds kunnen zorgen, maar de PCE van de coatings verhindert dit nog sterk [18].

De duurzaamheid van leds wordt ook uitgedrukt in levensduur. Leds in het algemeen worden als *solid state device* gezien als bijzonder robuuste verlichting ten aanzien van mechanische trillingen. Niettegenstaande kan een slecht productieproces toch tot een korte MTTF leiden. Degradatie van het attaché-epoxy en de aansluitpunten, het verkleuren van de metaalreflectors en het stukgaan van de p-n-junctie ten gevolge van hoge temperaturen zijn factoren die levensduur sterk beïnvloeden. Een studie uit 2005 schatte de MTTF van zes verschillende soorten commercieel beschikbare high-power witte leds (350mA) en wees uit dat de levensduur voornamelijk bepaald wordt door de p-n-junctietemperatuur [19]. In het artikel wordt het begrip T-punt-temperatuur gedefinieerd. Wanneer temperatuurmetingen gedaan worden aan leds is het bijna onmogelijk om direct op de junctie te meten. Daarom werd een criterium aangehouden dat de temperatuur meet direct aan het oppervlak van de LED rond de behuizing, namelijk de T-punt-temperatuur. De studie concludeerde dat een T-punt-temperatuurverschil van 21 °C een invloed van 30% heeft op de lichtsterkte na een inbedrijfstelling van 1000h.

2.4.3 Power Line Communication

PLC gebruikt het energienet als drager voor informatie. Omdat dit net niet ontwikkeld is met het oog op datacommunicatie, zijn er een aantal moeilijkheden.

Ruis is in verschillende vormen aanwezig op het energienet [20],[21]:

- gekleurde achtergrondruis, deze ruis is afkomstig van zwakke ruisbronnen. De spectrale vermogensdichtheid (PSD) kan beschreven worden door:

$$N(f) = 10^{b-cf^d}, \quad (2.12)$$

waar f de frequentie van het signaal is en de parameters b , c en d bepaald worden door het type kanaal.

- smalbandige ruis, apparaten die signalen in specifieke frequentiebanden gebruiken, zoals TV's, zijn bronnen van deze ruis.
- impulsruis, deze wordt op het net geïntroduceerd door het schakelen van apparatuur in het net. Het heeft een variabele tijdsduur en een relatief hoge energie-inhoud.

Voor de laatste vorm van ruis zorgt voor de meeste bitfouten in het kanaal [22].

Omdat elektriciteitsnetten aftakkingen hebben en uit verschillende soorten bekabeling bestaan, ontstaan er impedantieverschillen die voor reflecties zorgen. Deze reflecties veroorzaken verzwakkingen van het signaal [20],[22].

Het afzwakken van het informatiesignaal is een factor die een belangrijke rol speelt bij het ontvangen en demoduleren. Naast reflecties is signaalverzwakking afhankelijk van de afstand tot de zender [20]:

$$S_r(d) = P_t \cdot 10^{-0.010d}, \quad (2.13)$$

waarin S_r het ontvangen en P_t het verzonden vermogen voorstellen, d is de afstand.

Het kanaal kan door middel van een overdrachtsfunctie voorgesteld worden, waarin de reflecties en verzwakking worden gemodelleerd [22]:

$$H(f) = \sum_{i=0}^n g_i \cdot e^{-((a_0+a_1 f^k)d_i - j2\pi f \frac{d_i}{v_p})} \quad (2.14)$$

Hierin is f de kanaalfrequentie, n het aantal paden, g_i het gewicht van het i^{de} pad, a_0 en a_1 de verzwakkingsparameters, k de verzwakkingsfactor, d_i de lengte van het i^{de} pad en v_p de golfsnelheid. Hieruit is af te leiden dat het kanaal frequentieselectief is en dat de reflecties verschillende amplitudes hebben.

De capaciteit C van een kanaal met bandbreedte B , signaalvermogen S en ruisvermogen N om informatie te versturen wordt beschreven door Shannon:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right). \quad (2.15)$$

Omdat Shannon ervan uit gaat dat de ruis en het signaal frequentie-invariant zijn, moet dit criterium aangepast worden [20]:

$$C = \int_{f_1}^{f_2} \log_2 \left(1 + \frac{S_{rr}(f)}{S_{nn}(f)} \right) df. \quad (2.16)$$

Externe factoren die zorgen voor interferentie zijn radio en andere draadloze communicatiemiddelen. Indien de frequentie hoog genoeg is ($>1\text{MHz}$), kan de PLC storing veroorzaken op draadloze verbindingen en andersom. De elektriciteitsleidingen gaan functioneren als antennes en de signalen worden niet meer verzonden via de kabels, maar eerder via de lucht in de vorm van EM-golven [23]. Naast onbedoelde interferentie is het relatief simpel om stoorsignalen of taps aan te brengen door kwaadwillenden via aansluitpunten op het net.

In [22] wordt een manier beschreven om de invloed van impulsruis te beperken, door middel van het bepalen van een gewogen gemiddelde van alle frequentiecomponenten:

$$SGC = \frac{1}{f_{max}} \frac{\sum A_i f_i}{\sum A_i}, \quad (2.17)$$

waarin A_i de amplitude van de i^{de} frequentiecomponent is, f_i de corresponderende frequentie en f_{max} de frequentie met de grootste amplitude is. Omdat impulsruis zich als een sinc-functie manifesteert rond één f_{max} , kan deze gedetecteerd worden aan de hand van de waarde van de *Spectrum Gravity Center* (SGC). Er kan dan overgeschakeld worden naar een draaggolf met een hogere frequentie om de invloed van de ruis te beperken.

In [20] wordt een manier beschreven waarmee de effecten van smalbandige interferentie tegengegaan kan worden. Door het signaal uit te spreiden in het frequentiedomein heeft deze ruis minder invloed. Dit wordt gedaan door middel van het coderen van elke bit met een bitreeks.

In [24], [25], [26] wordt door middel van OFDM kanaalruis aangepakt, door het constant analyseren van het net wordt beslist om bepaalde draaggolven aan of uit te schakelen. Ook wordt de modulatie-techniek voor elke draaggolf aangepast aan de hoeveelheid ruis op het kanaal, zo kan een lagere BER bereikt worden en is het voorkomen van interferentie met draadloze links een kwestie van het afschakelen van één of meerdere draaggolven.

In [27] worden reflecties in het net beperkt door het toepassen van een *matched circuit*. Hierdoor worden reflecties aan de zender- en ontvangerkant beperkt en is er maximale energieoverdracht. Uit onderzoek naar een geïntegreerd systeem waar data eerst verstuurd worden via het lichtnet en vervolgens via leds, blijkt de grote invloed van pulsvormige ruis op het systeem[21]. In het artikel wordt een voorstel gedaan om met behulp van 'turbo coded OFDM' een lagere BER te behalen. Door het dubbel coderen van de data en *interleaving* toe te passen na de 1^{ste} codering ontstaat een bitreeks die meer robuust is tegen de ruis van het lichtnet.

Hoofdstuk 3

Concept voor het ontwerp

Het PvE leidt tot een 1^{ste} stap in de ontwikkelfase en valt uiteen in een reeks aspecten die deelfuncties en hulpfuncties vormen van het volledige systeem. Deze aspecten zijn onderdelen die typisch zijn voor dit systeem. Wanneer voor elke deel- en hulpfunctie een ontwerpfase doorlopen wordt, ontstaat na synthese van alle deelontwerpen een blauwdruk voor het hele ontwerp.

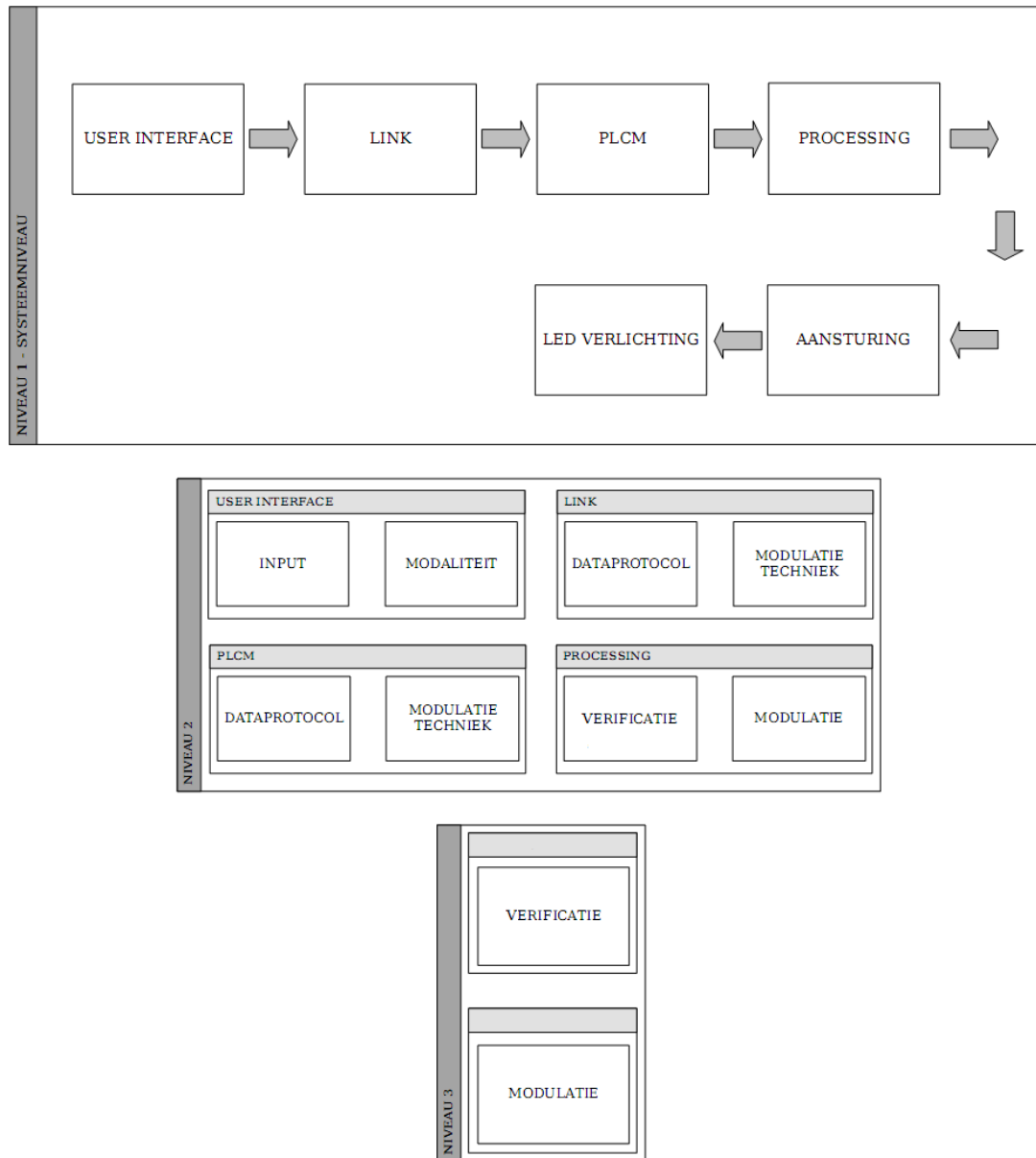
Als hulpmiddel tijdens de ontwerpfase wordt er gekeken naar de mate waarin eigenschappen van de respectievelijke deelfuncties met elkaar gekoppeld zijn en welke eigenschappen een grotere prioriteit krijgen binnen het hele ontwerp. Eigenschappen zijn inputs voor deel- en hulpfuncties die allemaal samen in een matrix worden afgewogen tegen elkaar.

Paragraaf 3.1 geeft een overzicht van de structuur van het hele systeem en paragraaf 3.2 beschrijft de deelfuncties. In paragraaf 3.3 wordt de graad van orthogonaliteit bepaald die aantoont hoe alle eigenschappen per deelfunctie met elkaar gekoppeld zijn. Vervolgens legt de prioriteit van alle kenmerken vast wat in het systeemontwerp behandeld wordt.

3.1 Topologie van het systeem

De hiërarchische opdeling van het systeem in Fig. 3.1 is opgebouwd uit drie niveaus. Het eerste niveau is het systeemniveau of toplevel. Dit niveau maakt een modulaire opdeling in equivalente blokken die samen het volledige systeem beschrijven. Hieruit komt sterk het basisprincipe van het hele systeem naar voren. De flow van data van een punt naar een ander punt is de meest abstracte beschrijving van de kerngedachte van deze thesis. In het tweede en derde niveau worden deze blokken verder onderverdeeld in meer deelfuncties. Niet alle blokken uit het eerste niveau kennen een verdere onderverdeling omdat ze op zich uit de kleinst mogelijke deelfuncties bestaan. Alle deelfuncties worden op het laagste niveau omgeschreven tot afzonderlijke functie-blokdiagrammen.

Een functieblokdiagram bestaat uit een aspect van het systeem, alle inputvariabelen of eigenschappen die het aspect typeren en een output die de functie specificeert. Na de uitwerking van de functieblokdiagrammen in de komende paragrafen volgt een werkplanning voor het ontwerp-traject. Deze bestaat uit een PERT en een Gantt-chart die beiden opgenomen zijn in appendix C.



Figuur 3.1: Topologie van het systeem

3.2 Deelfuncties van het systeem

De deelfuncties zoals die voorkomen in Fig. 3.1, waarvoor een functioneel blokdiagram wordt opgemaakt zijn:

- user interface
- link
- PLCM
- verificatie
- modulatie
- aansturing
- ledverlichting

In niveau 3 van Fig. 3.1 wordt een opdeling gemaakt in verificatie en modulatie. Deze deelfuncties hebben geen verdere opdeling in andere subfuncties. Dit is in het ontwerpproces zo gegroeid. Aanvankelijk bestonden deze deelfuncties uit meerdere onderdelen die tijdens het ontwerp overbodig bleken. Toch is er besloten om op dit niveau het ontwerp niet meer aan te passen. De overbodige onderdelen zijn geschrapt en de deelfuncties behouden hun functionaliteit.

3.3 Orthogonaliteit, prioriteit en functieblokdiagrammen

Met het oog op het ontwerp van een systeem is het voordelig om te kijken welke eisen orthogonaal zijn. Sommige eisen zijn sterker met elkaar verbonden dan andere en daarom is het nodig om alles op een overzichtelijke manier tegen elkaar af te wegen. In Tabel 3.1 tot en met 3.13 is de orthogonaliteit van alle eigenschappen uiteengezet op basis van het PvE. Hiervoor wordt telkens een matrix gebruikt waarin de eigenschappen tegen elkaar worden afgewogen aan de hand van een classificatiecriterium.

De grootste graad van onafhankelijkheid geldt voor de kenmerken met het minste aantal koppelingen. In Tabel 3.2 tot en met 3.14 is aangeduid hoeveel zwakke en heel zwakke koppelingen er zijn per kenmerk.

Omdat het uiteindelijke ontwerp resulteert in een commercieel product, worden er concessies gemaakt om tot een realistische productieprijs te komen. In het systeemontwerp leidt dit tot prioriteiten binnen de lijst van kenmerken. Tabel 3.2 tot en met 3.14 geeft met een ordinale schaal (1 tot 5) aan hoe deze prioriteiten gesteld worden. Hierin is 5 de grootste prioriteit. De prioriteit geeft aan in welke mate er rekening wordt gehouden met een systeemkenmerk tijdens het ontwerpproces van de respectievelijke deelfunctie.

3.3.1 User interface

De user interface maakt een koppeling tussen de centrale database en het transmissiekanaal waarover de data uitgestuurd worden. Het berust op input van de gebruiker en heeft als doel de gebruiker zo intuïtief mogelijk controle te verschaffen over het LED-pricing systeem. In niveau 2 van Fig. 3.1 valt dit blok uit een in een input en een modaliteit.

De input zijn alle gegevens die uit een database naar de SSLs moeten doorgestuurd worden, en de modaliteit beschrijft de wijze waarop de gebruiker interactie heeft met het systeem. Het gebruik van een database en de eis van een centrale terminal (2.2.1.10) legt vast dat de *user interface* een stuk software is dat op een PC of server moet draaien.

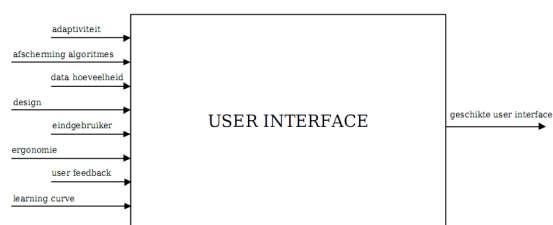
De eigenschappen van deze deelfunctie zijn onderwerpen uit verschillende gebieden van de wetenschap, zoals psychologie, informatica, elektrotechniek en industrieel ontwerpen [28]. Belangrijk bij het ontwerp van een *user interface* zijn de functies die met het systeem uitgevoerd moeten kunnen worden op basis van input van de gebruiker. Dit leidt indirect tot de eis (2.2.3.18) waarin duidelijk gesteld wordt dat algoritmes afgeschermd moeten worden van de gebruiker. Hoever de gebruiker kan gaan in het instellen van het systeem, bepaalt tot welk niveau het systeem een blackbox is waarvan alleen de werking bekend is, en niet de interne functionaliteit. Dit is sterk gekoppeld met het type eindgebruiker, en de manier waarop het design uitgevoerd is. Adaptiviteit geeft aan hoe de *user interface* aangepast moet kunnen worden aan de context of gebruiker. Het design hangt sterk samen met de eindgebruiker, de ergonomie en de snelheid waarmee de gebruiker vertrouwd raakt met het systeem. De eindgebruiker is bijna met alle eigenschappen sterk gekoppeld omdat een gebruiker het uitgangspunt is voor het toepassen van een *user interface*.

Prioriteiten worden gelegd in de kenmerken eindgebruiker, afscherming algoritmes, design en *user feedback*. In LED-pricing zijn er twee plaatsen waar de gebruikers van het systeem terugkoppeling krijgen. Elk prijskaartje heeft een rode indicatie-led die oplicht wanneer de ontvangen informatie fout is en aan de ontvangerkant feedback geeft aan de gebruiker. Aan de zenderkant is de *user interface* de enige voor de hand liggende mogelijkheid om terugkoppeling naar de gebruiker te voorzien.

Tabel 3.1: User interface koppelingen

User interface	Learning curve	User feedback	Ergonomie	Eindgebruiker	Design	Data hoeveelheid	Afscherming	Adaptiviteit
Adaptiviteit	- -	-	+	+	0	- -	- -	X
Afscherming	- -	0	- -	+	+	- -	X	
Data hoeveelheid	- -	-	- -	- -	-	X		
Design	+	0	++	++	X			
Eindgebruiker	++	+	++	X				
Ergonomie	- -	- -	X					
User feedback	++	X						
Learning curve	X							

Tabel 3.2: User interface prioriteiten



Figuur 3.2: User interface blokdiagram

User interface	# zwakke koppelingen	Prioriteit kenmerk
Adaptiviteit	4	2
Afscherming	4	5
Data hoeveelheid	7	2
Design	1	4
Eindgebruiker	1	5
Ergonomie	4	2
User feedback	3	4
Learning curve	4	3

3.3.2 Link

De link is het geheel van onderdelen die, van de terminal tot het punt waar de informatie op het lichtnet wordt aangeboden, de datatransmissie verzorgen. In Fig. 3.1 valt op niveau 2 het blok uiteen in een dataprotocol en een modulatietechniek.

Het dataprotocol is de verzameling afspraken tussen zender en ontvanger die bepaalt op welke wijze de data over het kanaal worden verstuurd. Hieronder vallen afspraken over het formaat van de te versturen informatie, het al dan niet toevoegen van redundante informatie en de afhandeling van transmissiefouten.

De modulatietechniek bepaalt hoe op hardwareniveau de data gecodeerd worden. De keuze hiervoor hangt af van het gekozen kanaal en kan voorwaarden omvatten als spanningsniveaus, lichtintensiteiten, en bittijden.

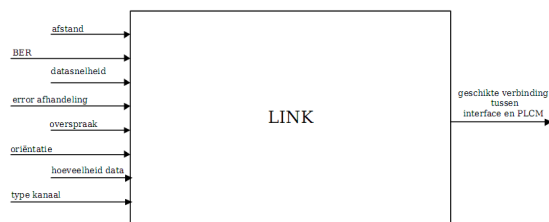
In Tabel 3.3 is af te lezen dat er sterke koppelingen aanwezig zijn in BER, datasnelheid en het type kanaal. De BER hangt samen met de afstand die het kanaal overspant. Daarnaast hangt de foutenkans af van de datasnelheid en de overspraak op het kanaal. Het vergroten van deze parameters leidt hoogstwaarschijnlijk tot een grotere BER. De datasnelheid is gekoppeld aan de overspraak en het type kanaal. Indien er licht als transmissiemedium gekozen wordt, kan er van een grote bandbreedte gebruik gemaakt worden. Dit kan leiden tot een hoge datarate. Ligt de keuze bij een elektrisch kanaal, dan zal het verhogen van de datarate, en dus de frequentie, zorgen voor een grotere capacitieve koppeling en dus een toename van de overspraak.

Als er gekeken wordt naar de prioriteiten van elk kenmerk, worden BER, datasnelheid en foutafhandeling als belangrijkste aangemerkt. Dit vloeit voort uit eis (2.2.3.9) van het PvE, de communicatie met het prijskaartje verloopt unidirectioneel. Omdat een prijskaartje het systeem geen notificatie geeft van verkeerd ontvangen informatie, is het van uitermate importantie dat de data minimale fouten bevat. Eis (2.2.1.9) stelt een bepaalde minimale verwerkingssnelheid van het systeem, deze wordt bepaald door de datasnelheid van de zender. Het is belangrijk dat de link aan deze eis voldoet.

Tabel 3.3: Link koppelingen

Link	Type kanaal	Hoeveelheid data	Oriëntatie	Overspraak	Foutafhandeling	Datasnelheid	BER	Afstand
Afstand	++	-	-	0	+	-	++	X
BER	+	-	+	++	- -	+	X	
Datasnelheid	++	0	0	+	0	X		
Foutafhandeling	-	-	+	- -	X			
Overspraak	+	- -	-	X				
Oriëntatie	0	-	X					
Hoeveelheid data	- -	X						
Type kanaal	X							

Tabel 3.4: Link prioriteiten



Figuur 3.3: Link blokdiagram

Link	# zwakke koppelingen	Prioriteit kenmerk
Afstand	3	3
BER	2	5
Datasnelheid	1	4
Foutafhandeling	4	4
Overspraak	3	1
Oriëntatie	3	2
Hoeveelheid data	6	1
Type kanaal	2	2

3.3.3 PLCM

De Power Line Carrier Modem bestaat uit twee identieke circuits: één modem aan de zijde van de terminal en een modem in elke led-buis. Op niveau 2 valt de PCLM uiteen in een dataproto-col en een modulatietechniek. Deze twee begrippen hebben dezelfde betekenis als genoemd in paragraaf 3.3.2. De keuze van het kanaal ligt echter vast, vanwege eis (2.2.3.15) moet de data over het lichtnet verstuurd worden.

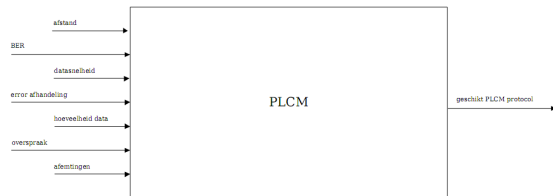
In Tabel 3.5 is af te leiden dat BER, datasnelheid, afstand en overspraak tot de sterk gekoppelde kenmerken behoren. Het vergroten van de afstand, de overspraak of beide geeft een grotere kans op bitfouten. Een vergroting van de afstand heeft enerzijds verzwakking van het signaal en anderzijds een toename in elektromagnetische koppeling tot gevolg. De datasnelheid heeft naast zijn invloed op overspraak ook gevolgen voor de foutafhandeling, er wordt namelijk een limiet gesteld aan de beschikbare afhandelingstijd.

Omdat de PLCM een verlengstuk is van de link, gelden de prioriteiten voor de BER, datasnelheid en het type kanaal als geven in paragraaf 3.3.2. Overspraak is hier een factor die belangrijk geacht wordt. Aangezien het kanaal van elektrische aard is, niet aangepast kan worden en niet is aangelegd met het oog op datacommunicatie, kan overspraak een belangrijke rol spelen.

Tabel 3.5: PLCM koppelingen

PLCM	Afmetingen	Hoeveelheid data	Overspraak	Foutafhandeling	Datasnelheid	BER	Afstand
Afstand	- -	-	+	+	-	++	X
BER	- -	-	++	+	+	X	
Datasnelheid	-	0	+	+	X		
Foutafhandeling	- -	-	- -	X			
Overspraak	- -	- -	X				
Hoeveelheid data	- -	X					
Afmetingen	X						

Tabel 3.6: PLCM prioriteiten



Figuur 3.4: PLCM blokdiagram

PLCM	# zwakke koppelingen	Prioriteit kenmerk
Afmetingen	6	4
Afstand	2	3
BER	1	5
Datasnelheid	1	4
Foutafhandeling	2	4
Overspraak	4	4
Hoeveelheid data	4	1

3.3.4 Verificatie

Verificatie is een niveau 3 abstractie van het hoofdblok processing. Processing vindt plaats in de led-buis door een processor, met als een van zijn taken verificatie. Hieronder vallen alle acties die te maken hebben met het waarborgen van een foutloze communicatie. Processen die hiertoe kunnen behoren zijn: foutherkenning, foutherstel en herzenden van foutieve data.

Tabel 3.7 geeft aan dat BER, datasnelheid, foutafhandeling, rekenkracht en geheugen zeer sterke koppelingen vertonen. De BER is gekoppeld aan elk van de afzonderlijke eigenschappen omdat het de taak van de verificatie is om deze te minimaliseren. Rekenkracht en geheugen zijn twee kenmerken die bepaalde limieten opleggen aan de mogelijkheid om fouten te detecteren en te corrigeren. Geheugen is nodig als buffer, indien er gebruik wordt gemaakt van het herzenden van foutieve data. Rekenkracht is nodig indien er wordt geprobeerd om fouten te corrigeren.

De prioriteiten liggen bij BER, datasnelheid en foutafhandeling. BER is essentieel voor de verificatie aangezien deze bepaalt hoe de bezetting van deze deelfunctie zal zijn. De koppelingen van BER met de overige kenmerken is sterk, in het bijzonder met de datasnelheid en de foutafhandeling. Vooral dit laatste item is sterk gerelateerd aan het waarborgen van een foutloze communicatie.

Tabel 3.7: Verificatie koppelingen

Verificatie	Afmetingen	Geheugen	Rekenkracht	Hoeveelheid data	Foutafhandeling	Datasnelheid	BER	Afstand
Afstand	-	--	--	--	+	-	+	X
BER	--	+	+	-	+	+	X	
Datasnelheid	--	+	+	0	+	X		
Foutafhandeling	--	+	+	-	X			
Hoeveelheid data	-	+	0	X				
Rekenkracht	-	0	X					
Geheugen	-	X						
Afmetingen	X							

Tabel 3.8: Verificatie prioriteiten



Figuur 3.5: Verificatie blokdiagram

Verificatie	# zwakke koppelingen	Prioriteit kenmerk
Afstand	4	2
BER	1	5
Datasnelheid	1	4
Foutafhandeling	1	4
Hoeveelheid data	3	1
Rekenkracht	1	3
Geheugen	1	2
Afmetingen	7	4

3.3.5 Modulatie

Modulatie heeft als taak de te verzenden data om te zetten naar een elektrisch stuursignaal volgens de modulatietechniek aangeleverd door [29]. Criteria die bij deze keuze een rol hebben gespeeld zijn interferentie, lichtintensiteit, datasnelheid, onzichtbaarheid, simpliciteit en efficiëntie. Dit deelblok zal in een processor geïmplementeerd moeten worden, waarbij nog extra voorwaarden opgelegd zullen worden.

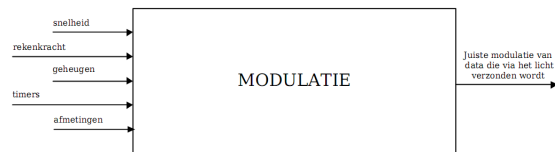
In Tabel 3.9 is af te lezen dat snelheid en rekenkracht sterke koppelingen bezitten. Zo zijn snelheid en rekenkracht aan elkaar gerelateerd via het aantal klokcycli per instructie (CPI). Verhogen van de snelheid heeft een verhoging van de rekenkracht tot gevolg.

De hoogste prioriteiten liggen bij de snelheid, rekenkracht en de timers van de processor. Om de opgelegde datasnelheid te kunnen navolgen moet de processor snel genoeg zijn om de benodigde instructies uit te voeren voor de modulatie. Dit is nauw verbonden met de rekenkracht die de processor bezit, gemeten in CPI. Omdat het bijhouden van tijdsintervallen belangrijk is voor het implementeren van een modulatietechniek, is het belangrijk om ook te letten op de timers die een processor bezit.

Tabel 3.9: Modulatie koppelingen

Modulatie	Afmetingen	Timers	Geheugen	Rekenkracht	Snelheid
Snelheid	- -	-	-	++	X
Rekenkracht	-	- -	-	X	
Geheugen	0	- -	X		
Timers	- -	X			
Afmetingen	X				

Tabel 3.10: Modulatie prioriteiten



Figuur 3.6: Modulatie blokdiagram

Modulatie	# zwakke koppelingen	Prioriteit kenmerk
Afmetingen	3	4
Snelheid	3	5
Rekenkracht	3	4
Geheugen	3	2
Timers	3	5

3.3.6 Aansturing

De aansturing bevat een elektronische schakeling die de led-buizen aanstuurt. leds hebben specifieke vereisten met betrekking tot het voedingscircuit. In LED-pricing moeten de led-buizen naast het verlichten van de ruimte ook data kunnen doorsturen met een datasnelheid van 6 kbit/s. Dit houdt in dat er een ontwerp nodig is van een elektronische schakeling die in staat is om aan beide eisen te voldoen. Het signaal dat binnenkomt uit de deelfunctie modulatie is een gemoduleerd stuursignaal dat letterlijk aangeboden moet worden aan alle prijskaartjes. De aansturing zorgt ervoor dat het stuursignaal de juiste eigenschappen krijgt om led-buizen aan te sturen. De schakeling moet compatibel zijn met de aansluitklemmen van TL-verlichting (2.2.3.1), (2.2.3.3). Dit betekent dat de elektronica van de aansturing aanwezig moet zijn in de led-buis.

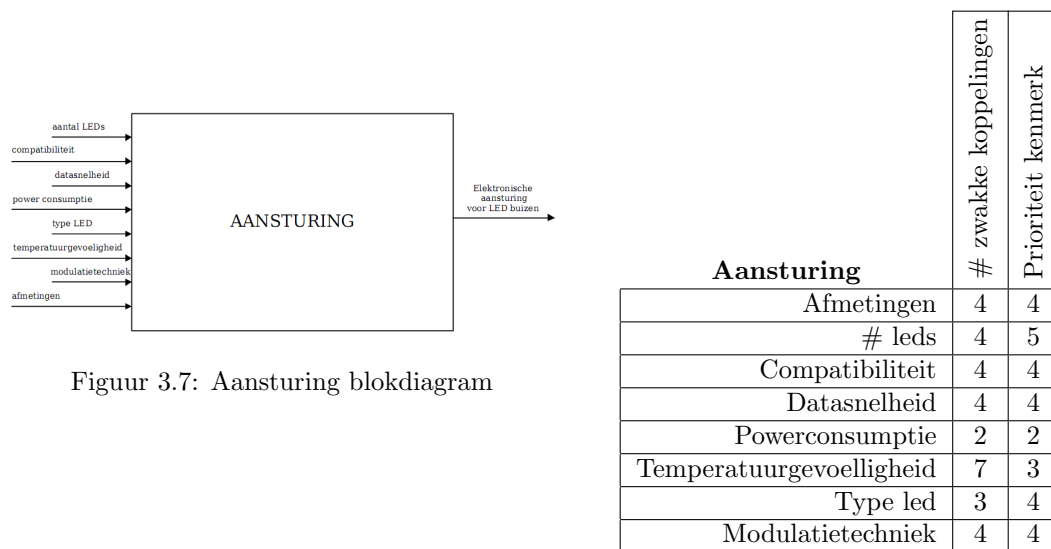
Omdat het gaat over een elektronische schakeling zijn bijna alle kenmerken gekoppeld met het vermogen dat de schakeling moet leveren en het vermogen dat erin gedissipeerd wordt. Het type led dat gebruikt wordt, bepaalt in sterke mate de maximale frequentie waarmee geschakeld kan worden en wat de vereisten zijn voor de uitgangsspanningen en uitgangsströmen. De modulatie-techniek is een eigenschap die reeds ingevuld is en verder niet meer aangepast kan worden. Niettegenstaande heeft de modulatie-techniek wel invloed op de powerconsumptie en de datasnelheid.

De prioriteiten voor de aansturing liggen bij datasnelheid, type led, aantal leds, compatibiliteit en modulatie-techniek. Het systeem moet in het geheel minder vermogen gebruiken dan een TL-verlichtingssysteem, eis (2.2.2.5) van het PvE. Er wordt in het ontwerp alleen rekening gehouden met de toedracht dat deze eis gehaald wordt.

Tabel 3.11: Aansturing koppelingen

Aansturing	Afmetingen	Modulatietechniek	Type led	Temperatuurgevoeligheid	Powerconsumptie	Datasnelheid	Compatibiliteit	# leds
# leds	+	-	-	--	++	--	0	X
Compatibiliteit	++	--	-	--	+	--	X	
Datasnelheid	--	+	+	-	+	X		
Powerconsumptie	-	+	++	-	X			
Temperatuurgevoeligheid	--	--	-	X				
Type led	0	0	X					
Modulatietechniek	--	X						
Afmetingen	X							

Tabel 3.12: Aansturing prioriteiten



Figuur 3.7: Aansturing blokdiagram

3.3.7 Led verlichting

Ledverlichting bevat een led-module in de led-buizen die bestaat uit een aantal leds die uniform en simultaan licht en data uitzenden. Een led-buis is naast leds gevuld met alle elektronica van de PLCM die de data ontvangt, de elektronica die de processing uitvoert voor de verificatie en de modulatie. Er moet bij het ontwerp nagedacht worden over de integratie van al deze onderdelen, zodat de fysieke dimensies van een led-buis overeenkomen met die van standaard TL-buizen (2.2.3.1).

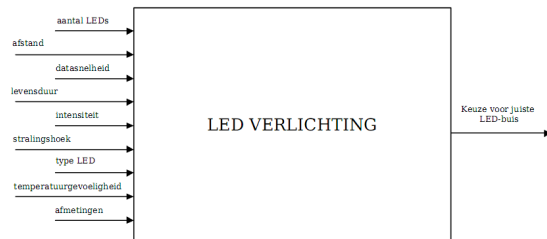
De mate waarin eigenschappen gekoppeld zijn, heeft te maken met de functie die led-verlichting heeft, namelijk het verlichten van de ruimte en het verzenden van data in gemoduleerd licht. De sterkste koppelingen zitten bijgevolg tussen de eigenschappen type led, intensiteit, afstand, stralingshoek en het aantal leds dat gebruikt wordt.

Prioriteiten worden gesteld aan de eigenschappen afstand, stralingshoek, intensiteit en datasnelheid. Het is uitermate belangrijk dat de afstand van de led-buis tot het digitale prijskaartje geen *bottleneck* vormt voor de transmissie van data. Even belangrijk is dat de gemiddelde lichtintensiteit gelijk is aan die van een systeem met TL-verlichting, of voldoet aan de standaardnormen voor warenhuizen (2.2.3.5). Deze vier eigenschappen zijn gekoppeld aan de voorwaarden met betrekking tot juiste overdracht en lichtintensiteit in de ruimte.

Tabel 3.13: Ledverlichting koppelingen

Ledverlichting	Afmetingen	Type led	Temperatuurgevoeligheid	Stralingshoek	Intensiteit	Levensduur	Datasnelheid	Afstand	# leds
# leds	++	-	--	+	++	0	--	++	X
Afstand	0	0	-	+	++	--	0	X	
Datasnelheid	-	+	--	0	0	-	X		
Levensduur	--	+	--	--	-	X			
Intensiteit	0	++	--	--	X				
Stralingshoek	-	++	--	X					
Temperatuurgevoeligheid	--	0	X						
Type led	0	X							
Afmetingen	X								

Tabel 3.14: Ledverlichting prioriteiten



Figuur 3.8: Ledverlichting blokdiagram

Ledverlichting	# zwakke koppelingen	Prioriteit kenmerk
Afmetingen	4	4
Type led	1	3
Temperatuurgevoeligheid	7	3
Stralingshoek	4	4
Intensiteit	3	5
Levensduur	6	4
Datasnelheid	4	4
Afstand	2	4
# leds	3	2

Hoofdstuk 4

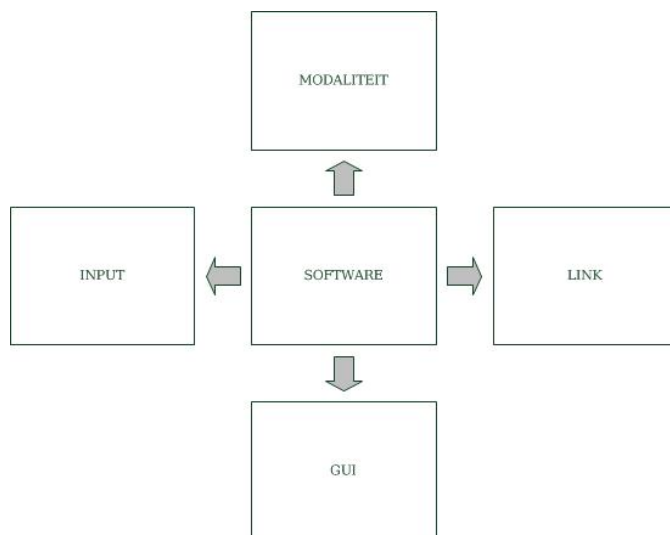
Ontwerp van het systeem

Aan de hand van de gevonden koppelingen en prioriteiten in paragraaf 3.3 kunnen keuzes gemaakt worden tussen verschillende opties om een deelfunctie in te vullen. Deze paragraaf zal voor elke deelfunctie een aantal geselecteerde mogelijkheden geven die aan de hand van de prioriteiten vergeleken worden, er zal dan een keuze gemaakt worden voor een van deze opties.

Belangrijk is het om ervoor te zorgen dat alle deelfuncties compatibel zijn, zodat er geen onderlinge conversie nodig is.

4.1 Ontwerp van de user interface

De twee voornaamste aspecten in het ontwerp van de user interface zijn input en modaliteit. Deze moeten volgens de prioriteit van kenmerken voornamelijk ervoor zorgen dat algoritmes afgeschermd worden voor de eindgebruiker, het design van de user interface afgestemd is op de eindgebruiker, en de juiste feedback gegeven wordt.



Figuur 4.1: Schematische weergave van de user interface

Uit eis (2.2.1.10) en (2.2.3.28) volgt dat de gebruiker input moet geven aan een PC die aanwezig is in het warenhuis. De meest vanzelfsprekende manier om feedback te geven aan een gebruiker is via een *Graphical User Interface* (GUI) op het PC-scherf van de computer. Er zou ook terugkoppeling kunnen zijn via een auditief kanaal of een vorm van mechanische terugkoppeling als er met *gesture-tracking* wordt gewerkt. LED-pricing is een functioneel product dat bediend moet worden door iemand met de functie van een warenhuismanager (2.2.1.12). De laatste twee voorstellen voor feedback vallen om deze reden dan ook af. Bij de ontwikkeling van software voor LED-pricing is het *Principle of Least Astonishment* (POLA) principe belangrijk. Het gebruik van een conventioneel toetsenbord en muis als modaliteit reduceert de *learning curve* en stelt de gebruiker in de mogelijkheid om door middel van een vertrouwd medium interactie te hebben met het systeem. Tabel 4.1 toont een overzicht van inputmodaliteiten die aangewend kunnen worden voor het verwerken van de input tot een signaal dat via de link, beschreven in paragraaf 4.2, uitgestuurd kan worden. Tabel 4.2 toont een overzicht van programmeertalen die de GUI, de modaliteit, de input en output aan elkaar linken zoals aangegeven in het schema van Fig. 4.1

Tabel 4.1: Overzicht van mogelijke modaliteiten

	Afscherming	Design	Eindgebruiker	User feedback
Toetsenbord en muis	Geen invloed	Standaard toetsenbord / muis	Sterk compatibel	GUI
Stem herkenning	Geen invloed	Microfoon / headset	Compatibel	GUI
Motion-tracking	Geen invloed	Camera	Weinig compatibel	GUI
Aangepaste joystick	Geen invloed	Desktop controller	Weinig compatibel	GUI
Host-controller	Geen invloed	(draadloze) controller	Weinig compatibel	GUI
Prijskaart simulator	Geen invloed	Handscanner met prijskaart	Compatibel	GUI
Touchscreen	Geen invloed	PC-scherf	Sterk compatibel	GUI

De keuze voor de modaliteit gaat uit naar een toetsenbord en muis die mogelijk geoptimaliseerd zijn voor het gebruik van LED-pricing. Extra modaliteit kan toegevoegd worden met een *touchscreen*. De programmeertaal waarin de software wordt ontwikkeld is Python.

Tabel 4.2: Mogelijke programmeertalen voor GUI implementatie

	Onwikkelen GUI	I/O
Java	Heel voordelig	Nadelig
C++	Nadelig	Voordelig
Python	Voordelig	Voordelig

4.2 Ontwerp van de link

De eis die het PvE stelt aan de link heeft te maken met de datasnelheid. Volgens eis (2.2.1.9) moet binnen één uur alle benodigde data voor het updaten van alle prijskaartjes verstuurd kunnen worden. Als er uit gegaan wordt van $2^{16} = 65536$ kaartjes, waarbij elk kaartje 32 ASCII characters bezit, een 2 byte *tag ID* en een 16 bits *Cyclic Redundancy Check* (CRC) kan de benodigde bitsnelheid R worden berekend:

$$R = \frac{(N_{ASCII} + N_{tag} + N_{CRC} + N_{protocol})N_{kaart}}{T_{max}} \quad (4.1)$$

Hierin is $N_{protocol}$ het aantal bits dat toegevoegd wordt in de vorm van bijvoorbeeld start en stopbits. T_{max} is de maximaal toegestane tijdsduur van de transmissie van alle data. De minimale bitsnelheid is voor dit systeem 5242 bits/s.

Daarnaast stelt eis (2.2.3.17) dat het protocol gestandaardiseerd dient te zijn. Aangezien de te verzenden informatie afkomstig is van een computer, is er een beperkte keuze van protocollen. In tabel 4.3 is een opsomming gemaakt van de gangbare protocollen en de bijbehorende eigenschappen, die in paragraaf 3.3.2 bestempeld worden met een hoge prioriteit.

Tabel 4.3: Vergelijking protocollen voor link [30],[31],[32]

	Bitrate (b/s)	Foutafhandeling	Lengte (m)
USB	480M	✓	5
RS232	19.2k	-	15
IEEE 1394 (FireWire)	3200M	✓	4.5
Line Print Terminal (LPT)	16M	-	10
Ethernet	100M	✓	100

Omdat het punt waar de signalen de PLCM binnenkomen zich op enige afstand van de computer kan bevinden, vallen USB en FireWire af.

LPT zou in het opzicht van afstand in sommige gevallen toegepast kunnen worden. Deze bus is echter sterk verouderd en op moderne computers niet meer aanwezig. Daarnaast heeft LPT een parallelle structuur, dus de kabel is relatief dik en bevat veel koper.

RS232 heeft voor de transmissie van data één startbit en één of twee stopbits nodig. De benodigde bitsnelheid volgens (4.1) met $N_{protocol} = 36 \cdot 2 = 72$ bedraagt 6554 bit/s, een snelheid die realiseerbaar is met RS232. Het nadeel van dit protocol is het ontbreken van een foutafhandeling. Ethernet is een protocol met voldoende capaciteit, een ingebouwde foutafhandeling en een groot bereik. Daarom heeft het gebruik van ethernet als verbinding tussen de computer en de PLCM de voorkeur [31],[32],[30].

4.3 Ontwerp van de PLCM

Evenals bij de link, is de capaciteit van de PLCM een belangrijke factor. Paragraaf 3.3.3 beschrijft waar de prioriteiten liggen bij de beslissing voor een PLC techniek. In tabel 4.4 is een opsomming gegeven van de verschillende standaarden en de bijbehorende eigenschappen. Hierin is overspraak niet opgenomen aangezien inkoppeling sterk afhankelijk is van de snelheid waarmee signalen veranderen en weinig samenhang vertoont met de gekozen PLC techniek.

Tabel 4.4: Vergelijking technieken voor PLCM [26],[33][24]

	Bitrate (b/s)	Foutafhandeling
G.hn	1G	✓
UPB	200	✓
HomePlug	100M	✓

Een van de eerste standaarden is X-10. Deze is niet in de tabel opgenomen aangezien deze niet geschikt is voor datacommunicatie. Bits worden met 120kHz bursts gecodeerd op een nul-doorgang van de net sinusvorm, bitsnelheden zijn mogelijk tot 20 bits/s. Dit protocol is slechts geschikt voor het aan en uitschakelen van apparaten in een huisomgeving [34],[35].

Universal Powerline Bus (UPB) is een verbetering op het X-10 protocol, waarbij elke halve periode van de netsinus 4-PPM wordt toegepast. Op deze wijze kunnen 4 bits per netperiode gecodeerd worden waarbij de bitsnelheid op een 50Hz energienet maximaal 200 bits/s kan bedragen. Deze snelheid is niet hoog genoeg voor het LED-pricing systeem [33].

G.hn is een standaard die naast PLC ook geschikt is voor andere media zoals telefoonlijn en coax. Het is gebaseerd op OFDM en maakt gebruik van *Forward Error Correction* (FEC), waarmee fouten gecorrigeerd kunnen worden. OFDM maakt het mogelijk om na een kanaalanalyse de draaggolven zo te kiezen dat een maximaal betrouwbare overdacht kan plaatsvinden [26],[36].

HomePlug is een standaard die lijkt op G.hn, maar deze is gemaakt voor het verbinden van multimedia binnenshuis [24],[25]. Gezien de snelheid, de ingebouwde foutcorrigerende codes en het meer industriële karakter van G.hn ten opzichte van HomePlug, is G.hn in het geval van LED-pricing de beste keuze.

4.4 Ontwerp van de verificatie

De verificatie dient voor het afzekeren van de data tussen de PC en de led-buis. Indien protocollen gekozen worden voor de link en PLCM die ingebouwde foutcorrectie bezitten is het overbodig om een extra controle karakter toe te voegen. Mocht dit niet het geval zijn dan zou CRC-CCITT een geschikte keuze zijn. Hiermee is het mogelijk om *burst* fouten te detecteren met een lengte tot 16 bits [37].

4.5 Ontwerp van de modulatie

In paragraaf 3.3.5 zijn de belangrijkste kenmerken van de deelfunctie modulatie vastgesteld. Het omzetten van het datasignaal van de PLCM naar een stuursignaal voor de leds zal in een microcontroller gebeuren. Voor er een toegespitste selectie gemaakt kan worden voor een bepaalde controller moeten er eerst een aantal algemene eisen gesteld worden.

De processor heeft 8 bits registers nodig, dit vergemakkelijkt de bewerkingen op de data aangezien deze uit ASCII symbolen bestaan die 1 byte lang zijn. Het aantal I/O pinnen kan laag zijn, er zal een seriële ingang van van de PLCM en een stuuruitgang voor de led-sturing nodig zijn. Daarnaast is een UART nodig voor het ontvangen van de seriële data.

Tabel 4.5: Vergelijking microcontrollers [38],[39],[40],[41],[42]

	Snelheid (Hz)	Timers	Rekenkracht (CPI_{avg})	RAM (bytes)	Afmetingen (mm)
P89V51	20M	3	8.8	1k	10X10
ATmega8	16M	3	1.4	1k	5X5
ATtiny2313	20M	2	1.6	128	4X4
ATtiny87	16M	2	1.4	512	5X5
16F690	20M	3	4.6	256	2.7X2.7

Om bepaalde fourtherkenningsalgoritmen toe te kunnen passen is het nodig om eerst een volledig datapakket te kunnen bufferen. De benodigde ruimte hiervoor volgt uit:

$$N_{total} = N_{ASCII} + N_{tag} + N_{CRC} \quad (4.2)$$

Voor de eerder genoemde specificaties van de prijskaartjes komt dit neer op $N_{total} = 288$ bits. Omdat het wenselijk is om het aantal componenten te beperken tot een minimum, zal de nadruk liggen op een zo groot mogelijke integratie op één microcontroller.

De ATtiny2313 en 16F690 vallen af, aangezien deze niet genoeg RAM aan boord hebben om aan deze eis te voldoen.

De fysieke afmetingen van de chip zijn van belang, aangezien de elektronica in een led-buis moet passen. Alle genoemde controllers zijn klein genoeg om dit te kunnen.

Rekenkracht en snelheid zijn twee gekoppelde kenmerken. Het quotiënt van deze twee getallen is een maat voor het aantal instructies dat uitgevoerd kan worden per seconde:

$$IPS = \frac{f_{processor}}{CPI_{avg}} \quad (4.3)$$

Hieruit kan geconcludeerd worden dat de ATmega8 en de ATtiny87 beide ongeveer 5 keer meer instructies per tijdseenheid uit kunnen voeren dan de P89V51.

Om een minimaal ontwerp te kunnen maken, wordt er eerst gekozen voor de ATmega8. Deze heeft 3 timers en een relatief groot RAM. Als de implementatie hierop succesvol is, kan er geprobeerd worden de programmatuur over te plaatsen naar de ATtiny87, een minder uitgebreide microcontroller. Op deze manier wordt er zo efficiënt mogelijk gebruik gemaakt van *resources* en wordt *overhead* geminimaliseerd.

4.6 Ontwerp van de aansturing

In paragraaf 3.3.6 worden de belangrijkste eigenschappen van de aansturing beschreven. De sturing moet passen in de behuizing van een normale TL-buis en het circuit plus leds moet minder vermogen gebruiken dan een conventionele TL-buis.

Om de leds te kunnen voeden vanuit het 230V lichtnet moet deze spanning eerst op een efficiënte manier omlaag getransformeerd worden naar een spanning die geschikt is voor de leds. Hiervoor zijn verschillende manieren beschikbaar, die opgesomd worden in Tabel 4.6.

Tabel 4.6: Vergelijking van aansturingen [43],[44]

	Efficiëntie	Modulatie	Afmetingen
Transformator	98%	++	–
Spanningsregelaar	15%	++	++
Buck converter	90 - 95%	-	+
Flyback converter	90%	-	+

De toepasbaarheid van een transformator is gering aangezien de ruimte beperkt is. Daarnaast is de uitgangsspanning weinig stabiel, er kan hiervoor een regelaar achter geschakeld worden om dit te verhelpen. Indien we de transformator weglaten en slechts een spanningsregelaar gebruiken is de efficiëntie te berekenen door het ratio van V_{out} en V_{in} :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} 100\% = \frac{V_{out}}{V_{in}} 100\% \quad (4.4)$$

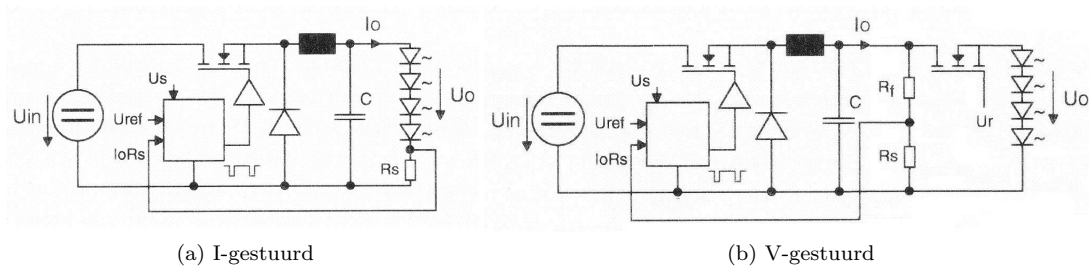
Bij een uitgangsvoltage van 30V (≈ 10 leds in serie) ligt de efficiëntie rond de 15%. Voor de toepassing van LED-pricing is dit onacceptabel.

Schakelende voedingen zijn in staat om efficiënt spanningen omhoog of omlaag te transformeren met geringe fysieke afmetingen. Een *buck converter* doet dit door middel van het aan- en uitschakelen van de voeding op een circuit bestaande uit een diode, een spoel en een condensator, zie Fig. 4.2a. Indien de transistor spert, loopt er een stroom naar de last door de spoel, die opgeladen wordt. De diode spert in deze toestand. Op het moment dat de transistor in geleiding treedt, kan de spoel zijn opgeslagen energie afstaan aan de last via de diode die nu in doorlaatrichting staat. De condensator dient als buffer voor de uitgangsspanning [44].

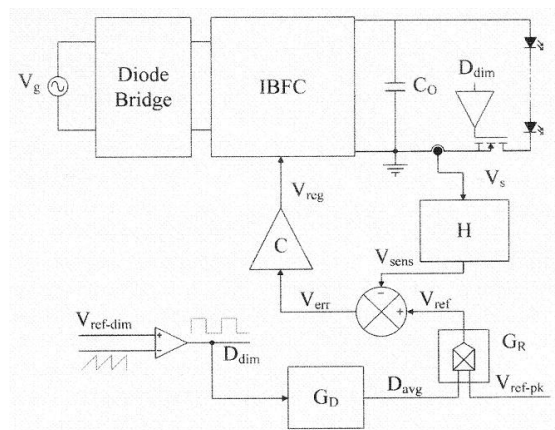
Een *flyback converter* gebruikt magnetisch gekoppelde spoelen om de ingangsspanning te transformeren, tegenover de *buck converter* levert dit een van de ingang elektrisch gescheiden uitgang op, aangezien de spoelen galvanisch gescheiden zijn [43]. Omdat het circuit zich binnen in de led-buis bevindt, is er voor de veiligheid geen gescheiden uitgang nodig, daarnaast is de *flyback* overbodig in een *buck converter*. De meest logische keuze die hieruit volgt is het gebruik van een *buck converter*.

De *buck converter* weergegeven in Fig. 4.2a is niet geschikt voor het voeden van een gemoduleerde led-buis. Via weerstand R_s wordt de stroom door de leds omgezet in een evenredige spanning die teruggekoppeld wordt naar de stuurschakeling. Indien de leds worden afgeschakeld door de modulatie zal de stuurschakeling dit opmerken door het wegvallen van de spanning over R_s en zal proberen om meer lading te transporteren naar de spoel. Hierdoor zal de spanning over de condensator blijven stijgen tot de leds weer worden aangeschakeld, dit kan leiden tot het falen van componenten. Volgens de auteurs van deze thesis zou het terugkoppelen van de uitgangsspanning, in plaats van de stroom door de leds, een oplossing kunnen zijn voor dit probleem. In Fig. 4.2b wordt met behulp van een correct gedimensioneerde spanningsdeler rond R_f en R_s de uitgangsspanning teruggekoppeld naar de stuurschakeling, hierdoor zal het sturen van lading naar de spoel stoppen als een bepaalde spanning bereikt is. Een nadeel van deze aanpak is dat er geen stroomregeling is en er dus een stroombegrenzing aangebracht dient te worden voor de leds.

Een uitgebreidere aanpak is voorgesteld in [45], zie Fig. 4.3. Hier wordt een terugkoppelnetswerk gebruikt waarin filtering plaats vindt tegen oscillaties. Dit zou mogelijk een meer geschikt circuit zijn voor de aansturing van de ledverlichting, schakelsnelheden tot 100kHz zijn behaald.



Figuur 4.2: Buck converter met modulatie [46]



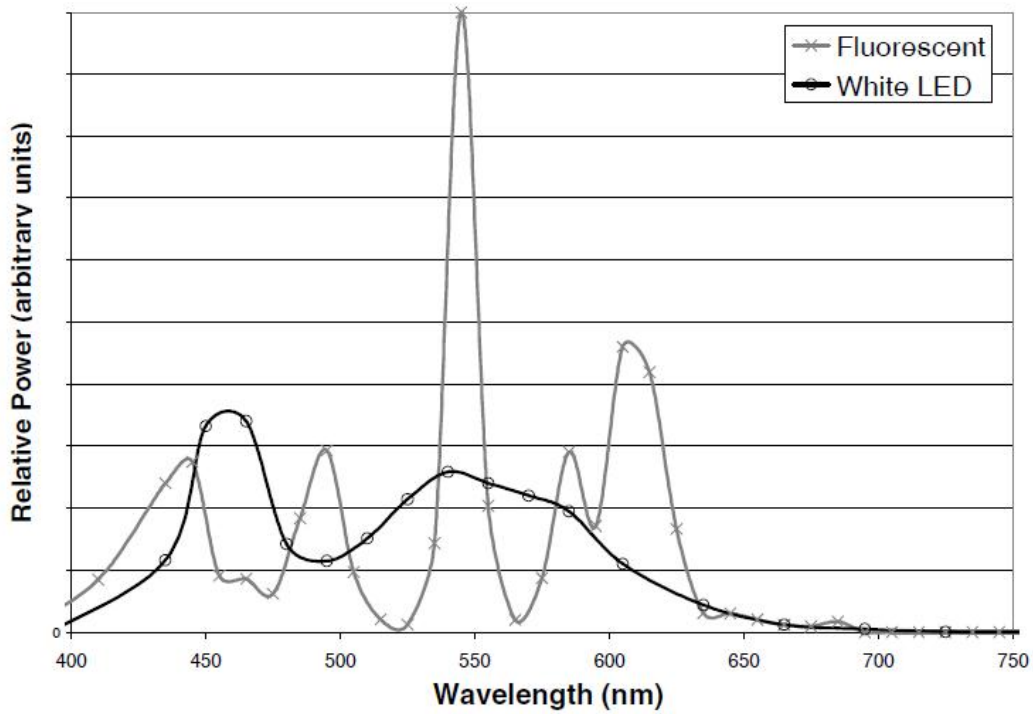
4.7 Ontwerp van de ledverlichting

In paragraaf 2.4.2 worden 3 gangbare methodes beschreven voor het produceren van witte leds. De meest gebruikte methode is de productie door middel van blauwe leds met een gele fosforcoating.

Belangrijk bij de keuze van leds is dat kleurrendering geen gaten vertoont in het spectrum. Dit kan leiden tot een inferieure indruk van objecten die een kleur hebben die binnen dat gat in het spectrum vallen [47]. In een omgeving waar consumenten producten aankopen, is het belangrijk dat hierdoor geen (on)bewust negatief koopgedrag ontstaat. Een ander fenomeen dat opduikt wanneer TL-verlichting vervangen wordt door leds is een schaduw effect. Als n leds worden gebruikt in een led-buis, kunnen er max. $2n$ schaduwlijnen ontstaan [47]. Voornamelijk bij gedetailleerd werk kan dit voor nadelen zorgen. Dit kan tegengegaan worden met een diffuus filter. Bij RGB-leds kunnen bovendien ook schaduwzones ontstaan rond objecten in 1 van de primaire kleuren.

In onderstaande tabel wordt een overzicht gegeven van de witte leds voor de toepassing van LED-pricing. De eigenschappen uit 3.3.7 die een hoge prioriteit krijgen zijn afmetingen, afstand van de zender tot ontvanger, de datasnelheid, intensiteit en stralingshoek.

Omdat de efficiëntie van blauwe leds met fosfor laag net de standaard bereikt van TL-verlichting, en *near-UV*-leds minder efficiënt zijn dan blauwe leds, wordt gekozen voor blauwe leds. Er dient ook rekening gehouden te worden met de luminantie spreiding. Bij leds is die nooit groter dan 180° . TL-buizen hebben een uniforme verdeling over 360° , wat betekent dat een gedeelte van het uitgestuurde licht nooit de functionele ruimte bereikt. Het uitgezonden spectra van een gemiddelde witte led (blauwe led met geel fosfor) wordt in Fig. 4.4 vergeleken met het spectra van een standaard TL-buis [47].



Figuur 4.4: Uitgezonden lichtspectra van een witte led en TL

Een standaard TL-buis van 1200mm met nominaal vermogen van 40W, heeft een gemiddelde efficiëntie van 90 lm/W of een totale lichtopbrengst van 3600lm. Een standaard Luxeon rebel White LED van Phillips heeft een ingangsvermogen van 1W, en een stralingshoek van 160° (omvat 90% van alle lichtflux), een gezichtshoek van 120° (lichtsterkte is groter dan -3dB) en een efficiëntie van 89 lm/W [48]. Hieruit wordt het aantal leds per buis berekend:

$$N = \frac{\Phi_{totaal}}{\eta \cdot V_{fLED} \cdot I_{LED}} \quad (4.5)$$

Omdat leds in X parallelle groepen van Y seriegeschakelde leds aangestuurd worden [49], kan dit in het ontwerp van de stuurschakeling afgerond worden naar 40 omwille van de deelbaarheid.

Tabel 4.7: Vergelijking type LEDs

	Intensiteit	Afstand	Afmetingen	Datasnelheid	Stralingshoek
RGB	+	++	+	++	++
Blue/fosfor	++	++	++	++	++
Near UV/fosfor	+	++	++	++	++

Uit tabel 4.7 is af te leiden dat er een grote vrijheid is in de keuze van het type led. Omwille van secundaire prioriteiten als complexiteit van de aansturing, schaduweffecten, efficiëntie en productieprijis wordt gekozen voor blauwe leds met gele fosforcoating. De duurzaamheid van witte leds is tegenwoordig gelijk aan die van TL-verlichting. Onderzoek naar phosphor coatings voor het vergroten van de efficiëntie toont aan dat commercieel beschikbare witte leds op basis van fosforcoatings bijgevolg ook zullen innoveren.

Hoofdstuk 5

Proof of Principle

Het ontwerp van hoofdstuk 4 wordt in dit hoofdstuk uitgewerkt met behulp van een *proof of principle*. Hierin worden een aantal aspecten van het ontwerp uitgewerkt tot een proefondervindelijk concept. Dit hoofdstuk van de thesis beschrijft het implementatieproces van een prototype dat garant staat voor enkele fundamentele aspecten van LED-pricing.

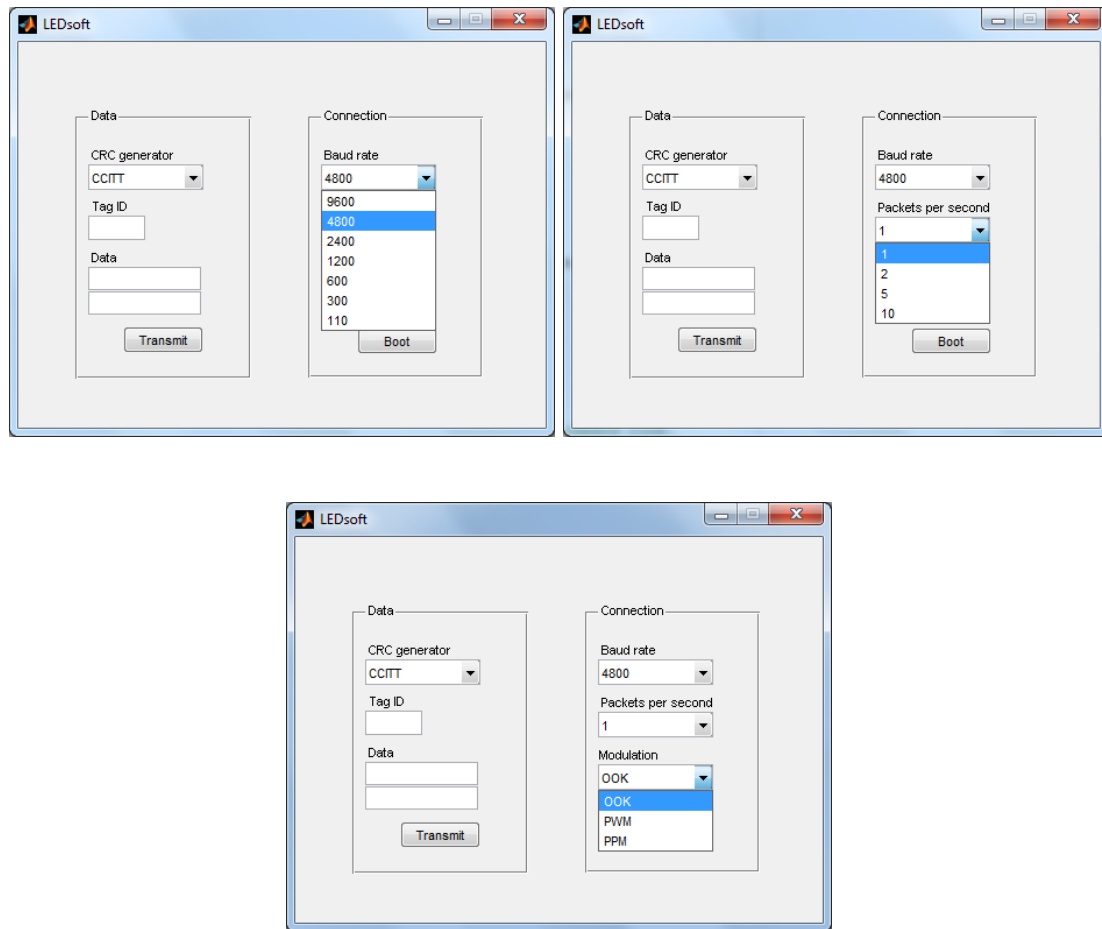
De opbouw van dit hoofdstuk is analoog aan de opbouw van hoofdstuk 4. Alle deelfuncties krijgen een implementatie die samen het *proof of principle* vormen. Omwille van een beperkt budget, een strikt tijdbestek en de complexiteit van het product, worden concessies gemaakt tijdens de implementatie van alle onderdelen. Dit wordt per paragraaf duidelijk aangegeven. In hoofdstuk 6 wordt dit prototype geëvalueerd.

5.1 Implementatie van de user interface

Als user interface implementatie is gekozen voor een stuk software dat geschreven is in MATLAB[®]. Een beperkte database van prijskaartjes bevindt zich op een terminal. Een GUI *LEDsoft.m* stelt de gebruiker in de mogelijkheid manueel data in te typen via het toetsenbord. Het dataveld bestaat uit twee rijen van 16 ASCII karakters die overeenkomen met het aantal karakters op een SSL. In Fig. 5.1 zijn drie screenshots te zien van de GUI.

De GUI is opgebouwd uit twee velden:

- Het linkse veld *Data* bevat een scrolldown menu voor de CRC die meegestuurd wordt met de data, een Tag ID die uniek is voor elk prijskaartje, en de data die afgebeeld moet worden op het SSL.
- Het rechtse veld *Connection* bevat alle gegevens die nodig zijn voor het instellen van een microprocesor die in paragraaf 5.5 verder besproken wordt. Deze gegevens zijn *Baud rate*, *Packets per second* en *Modulation*. Het aantal *Packets per second* is een optie die het tijdens een eerste reeks testen mogelijk maakte om met trage snelheid data over te sturen om visueel te controleren of de data goed verzonden werd. Het hele veld *Connection* is enkel toegevoegd om de microprocessor aan te sturen, en zou in een uiteindelijk ontwerp voor een warenhuis niet meer zichtbaar zijn voor de gebruiker.



Figuur 5.1: GUI — *LEDsoft.m*

De CRC die wordt meegegeven is in Fig. 5.1 ingesteld op CCITT wegens het gebruiken van het RS232 protocol beschreven in paragraaf 5.2. De polynoom die gebruikt wordt om de CRC te implementeren in het prototype wordt onderzocht in [29]. Daarin worden afwegingen ten aanzien van de implementatie uitgebreid bestudeerd.

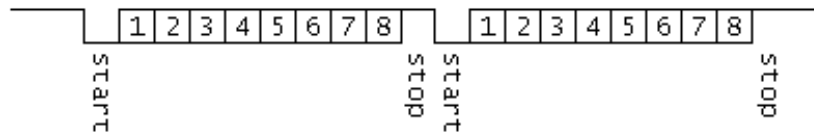
5.2 Implementatie van de link

Voor de implementatie van de link is er in plaats van ethernet gekozen voor het RS232 protocol. MatLab kan hier op een gemakkelijke manier mee communiceren en hardware heeft enkel een *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter* (UART) nodig om data te kunnen ontvangen. Omdat deze in veel microprocessoren aanwezig is, wordt RS232 gezien als een goed alternatief voor ethernet in het *proof of principle*.

RS232 gebruikt assynchrone communicatie waarbij door middel van start- en stopbits locale synchronisatie wordt bewerkstelligd. De hardwarematige verbinding bestaat uit een zenddraad (TxD), een ontvangstdraad (RxD) en een massa (GND).

Twee elektrische toestanden worden onderscheiden, een *Mark* komt overeen met een voltage tussen de -5V en -15V gemeten tussen RxD/TxD en GND. Een *Space* komt overeen met een voltage tussen de 5V en 15V gemeten tussen RxD/TxD en GND. Indien er geen data worden verzonden zijn de RxD en TxD in de *Mark* toestand.

Data worden serieel verzonden in pakketten van 10 bits. Het eerste bit is het startbit (*Space*) dat aangeeft dat er een pakket begint. Op het moment dat de *Mark/Space* transitie wordt opgemerkt start er een klok met voorafgesproken snelheid die afhangt van de *baud rate*. Het tiende bit is een stopbit en is altijd gelijk aan een *Mark*, dit bit heeft als functie om te garanderen dat een begin van een karakter altijd samengaat met een *Mark/Space* overgang. In Fig. 5.2 is een typische RS232 golfvorm weergegeven [50].



Figuur 5.2: Typische RS232 golfvorm

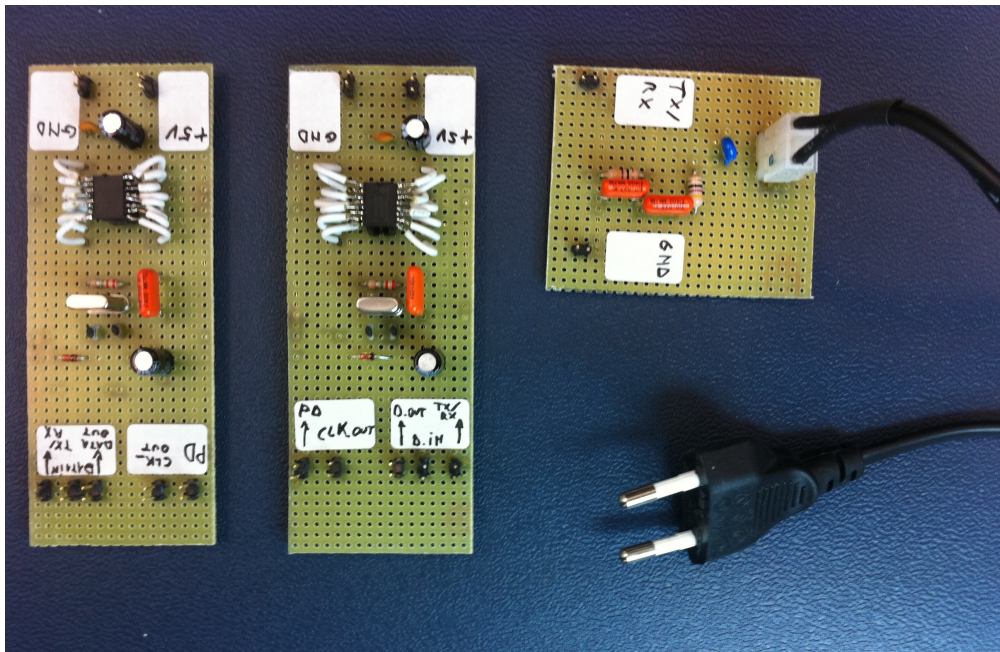
Er is gekozen voor het formaat van 8 databits, geen *paritybit* en 1 stopbit. Omdat het gros van de data bestaan uit 8 bit ASCII karakters is het versturen van meer dan 8 bits overbodig. Om maximale snelheid in de UART te kunnen behalen is het *paritybit* en het 2^e stopbit weggelaten. Foutcorrectie zal op een hoger niveau gebeuren dan op karakterniveau zoals beschreven in paragraaf 4.2.

5.3 Implementatie van de PLCM

Het RS232 protocol uit vorige paragraaf wordt aangesloten op een PLC-kanaal. Er is gekozen voor een *home automation modem* die voldoet aan de NEN-EN 50065-1 norm. Deze norm beschrijft de standaard voor communicatie over het lichtnet in de frequentieband van 3kHz tot 148.5kHz. Binnen deze frequentieband zijn een aantal subbanden gedefinieerd waarbij de banden tussen 95kHz en 148.5kHz bestemd zijn voor gebruik door consumenten. De maximale amplitude van datasignalen mag 134 dB μ V zijn [51].

De chip die we hiervoor geselecteerd hebben is een PHILIPS TDA5051. Deze chip heeft een *baudrate* van 1200 en gebruikt ASK voor het moduleren van de data. De lage baudrate van de TDA5051 is de *bottleneck* voor de datasnelheid in het volledige LED-pricing prototype. Als test is het circuit uit Fig.18 van de data sheet van de TDA5051 gebouwd [52]. Hierbij is gekozen voor een klokfrequentie f_{osc} van 8MHz, waaruit een modulatiefrequentie volgde van $1/64 \cdot f_{osc} = 125\text{kHz}$.

Omwille van de strenge soldeervoorschriften die gelden voor SO16 chipverpakkingen is het niet gelukt om dit circuit op een succesvolle manier werkend te krijgen. Metingen na het bouwen gaven correcte voedingsspanningen aan maar geen kloksignaal op CLK_{OUT} . Fig. 5.3 is een afbeelding van twee TDA5051 circuits die als zender en ontvanger gebouwd zijn voor het prototype, en het circuitboard helemaal rechts is een filter die tussen de TDA5051 en het lichtnet zit.



Figuur 5.3: Afbeelding van het PLC-circuit

5.4 Implementatie van de verificatie

De verificatie bestaat uit een CRC die de data van één prijskaart afzekert over het elektrische kanaal. Zoals beschreven in paragraaf 4.4 kan er op de terminal een CRC berekend en toegevoegd worden aan de datastroom. Wegens tijdgebrek is de controle van de CRC niet geïmplementeerd in de microcontroller, het programmeren van de drie modulatietechnieken had voorrang. Daarnaast zou deze niet nodig zijn in het werkelijke LED-pricing systeem aangezien zowel ethernet als G.hn ingebouwde foutafhandeling hebben. De MatLab code die de CRC berekent is bijgesloten in appendix B.

5.5 Implementatie van de modulatie

De modulatie is geïmplementeerd met behulp van een ontwikkelbord gebaseerd op de P89V51RD microcontroller van NXP Semiconductors. De keuze voor deze hardware ligt bij de snelle beschikbaarheid ervan en het feit dat er reeds een RS232 interface aanwezig was op het bord, wat een grote tijdsbesparing oplevert tegenover het zelf bouwen van een hardwaresysteem.

De software voor de microcontroller is geschreven in de 8051 *assembly language* omdat dit volledige controle over de processor geeft, programmeren in hogere talen zoals C verbergt veel details over de werkelijk gegenereerde code. Om verschillende soorten modulatie-technieken te kunnen testen zijn er drie, door de user interface selecteerbare, modulaties geprogrammeerd:

- OOK
- PWM
- PPM

De implementatie van OOK maakt gebruik van een timer die een interrupt triggert op het moment dat deze zijn maximale telwaarde heeft bereikt. De timer wordt dan geladen met een vooraf berekende waarde die bepaalt hoeveel tijd er tussen opeenvolgende interrupts zit, dit herhaalt zich $n = 8$ keer zodat er een tijdslot is voor elk bit. De routine die de interrupt afhandelt kijkt naar een register waar de 8 databits van het RS232 pakket zich bevinden. Aan de hand van de waarde van het n^{de} bit wordt de uitgang geset of gereset. Indien er geen data aanwezig is om te verzenden, geldt voor alle modulatietechnieken dat de uitgang geset is, zodat de verlichting normaal brandt.

Pulse Width Modulation (PWM) maakt gebruik van 2 timers. Één van de timers, T_1 , genereert net als bij OOK tijdslots voor PWM pulsvormen. De routine die de interrupt voor T_1 afhandelt stelt aan de hand van het n^{de} databit de tijdsduur in van een tweede timer T_2 en set de uitgang. Indien T_2 zijn maximale telwaarde bereikt wordt de uitgang gereset. Door voor een '0' een korte en een '1' een lange tijdsduur van T_2 in te stellen, ontstaan er PWM golfvormen.

Het is mogelijk om 4-PPM te implementeren als er naar groepjes van 2 databits gekeken wordt, deze coderen dan 4 mogelijke tijden voor T_2 . In plaats van 8 tijdslots zijn er dan 4 nodig aangezien er 2 bits per slot gecodeerd worden.

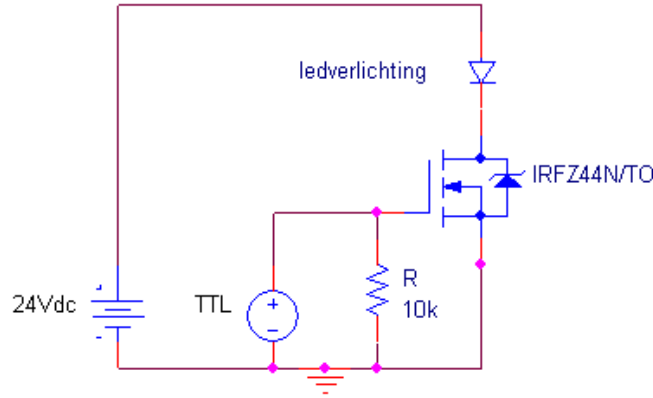
Pulse Position Modulation (PPM) maakt gebruik van de programmastructuur van PWM. Indien T_1 een interrupt triggert wordt er aan de hand van het n^{de} databit een tijdsduur voor T_2 ingesteld. Op het moment dat T_2 zijn maximale telwaarde bereikt, wordt de uitgang voor een vaste tijdsduur gereset en daarna weer geset. Ook hier is het mogelijk om meerdere bits per tijdslot te coderen door het vergroten van de mogelijke tijdsduren, de breedte van de PPM puls blijft echter wel gelijk.

De motivatie voor de uiteindelijke modulatietechniek en een uitgebreide uitleg hiervan wordt behandeld in [29]. Voor de gedetailleerde codes wordt er verwezen naar appendix A.

5.6 Implementatie van de aansturing

Het gemoduleerde signaal dat uit de microcontroller komt, wordt in deze paragraaf gebruikt als stuursignaal voor de aansturing van de ledverlichting. De implementatie van de ledverlichting wordt besproken in paragraaf 5.7. Van belang voor het ontwerp van de aansturing zijn de spanning V_l en de stroom I_l die bij de belasting van de ledverlichting horen. Uit de data sheet van de ledverlichting blijkt dat V_l 24V en I_l 120mA moet zijn.

Twee voor de hand liggende implementaties voor het aansturen van de led-buis zijn schakelingen opgebouwd rond een n- of p-channel MOSFET en een npn of pnp bipolaire transistor. Twee beschikbare componenten hiervoor zijn respectievelijk een HEXFET[®] n-channel Power MOSFET met typenummer IRFZ44N en een npn general purpose bipolaire transistor van FAIRCHILD met typenummer 2N3904 [53],[54]. De MOSFET heeft een heel lage $R_{DS(on)}$ van $17.5m\Omega$ en een rise- en falltime van respectievelijk 60ns en 45ns. Een bipolaire transistor daarentegen heeft normaliter een grotere transconductantie dan een MOSFET. Omdat er geschakeld moet worden, en dus geen lineaire versterking nodig is, is een MOSFET energiezuiniger voor deze schakeling. De topologie van de schakeling in Fig. 5.4 is opgebouwd rond de IRFZ44N MOSFET.



Figuur 5.4: Topologie van de aansturing.

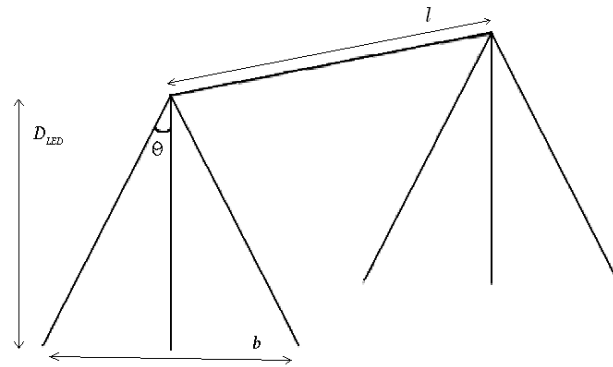
Het vermogen dat gedissipeerd wordt in de MOSFET tijdens belasting is: $I^2 \cdot R = 0.120^2 \cdot 17.5 \cdot 10^{-3} \text{ W} = 2.52 \cdot 10^{-4} \text{ W}$. De weerstand R in het circuit zorgt dat aanwezige lading op de gate kan wegvloeien als de uitgang van de microprocessor ongedefinieerd zou zijn. De waarde van de weerstand moet hoog genoeg zijn zodat uitgangstroom van de microprocessor beperkt blijft. De voedingsspanning is 24 Volt.

5.7 Implementatie van de ledverlichting

Tot slot is voor de implementatie van de ledverlichting gekozen voor een *off-the-shelf* beschikbare configuratie van leds. Een led-buis van het merk OMC, typenummer OMT5-30D1d met een lengte l van 30cm, bevat 18 leds en dient te worden aangesloten op een voedingsspanning van 24V DC [55]. De halve gezichtshoek θ is 30° (lichtsterkte is groter dan -3dB) en het nominaal vermogen P_{nominaal} 2.88W. In Fig. 5.5 wordt een abstracte weergave getoond van de ledverlichting, waarin θ de gezichtshoek is. In de datasheet [55] wordt een lichtsterkte gespecificeerd op een afstand D_{led} van 0.5m van de led-buis van 700lux. Via volgende formule kan deze omgerekend worden naar een efficiëntie η binnen de gezichtshoek θ uitgedrukt in lm/W:

$$\eta = \frac{E_v \cdot A}{P_{\text{nominaal}}} = \frac{E_v \left(l \cdot b + 2 \cdot \left(\frac{(\frac{b}{2})^2 \cdot \pi}{2} \right) \right)}{P_{\text{nominaal}}} = \frac{E_v \left(l \cdot 2 \cdot D_{\text{led}} \cdot \tan(\theta) + 2 \cdot \left(\frac{(2 \cdot D_{\text{led}} \cdot \tan(\theta))^2 \cdot \pi}{2} \right) \right)}{P_{\text{nominaal}}} \quad (5.1)$$

Met het invullen van de parameters levert dit een efficiëntie $\eta = 105 \text{ lm/W}$ binnen de gezichtshoek 2θ .



Figuur 5.5: Schematische weergave van de ledverlichting

Hoofdstuk 6

Evaluatie van Proof of Principle

Om een evaluatie te kunnen doen van het *proof of principle* is besloten om een stuk software te schrijven in MatLab waarin grote hoeveelheden willekeurige data verstuurd worden. Deze data worden uitgezonden vanaf een PC naar de RS232 link van het *proof of principle*. Vervolgens wordt er optische detectie uitgevoerd waarvan de data worden vergeleken met de verstuurde data. Tot slot wordt een BER berekend.

Paragraaf 6.1 beschrijft het ontwerp van de testopstelling. Naast de code in MatLab is hiervoor is een elektronisch detectorcircuit gebouwd dat gebaseerd is op een fototransistor en versterking met opamps. Het uitgangssignaal van het detectorcircuit wordt aangeboden aan de geluidskaart van de PC. In een ander stuk MatLab-code wordt het signaal als .wav bestand ingelezen en wordt de data vergeleken. Paragraaf 6.2 beschrijft de overgang naar het *proof of concept*.

6.1 Prestatie Proof of Principle

De selectie van een sensor voor optische detectie resulteerde in een EPD-470 fotodiode met een piek spectrale gevoeligheid λ_p bij 470nm en een relatieve spectrale gevoeligheid van $0.75\lambda_p$ bij 450nm [56]. De *cutoff*-frequentie f_c bedraagt 2.5MHz, indien er OOK-modulatie toegepast wordt, kan de maximale bitsnelheid die de sensor kan waarnemen weergegeven worden door:

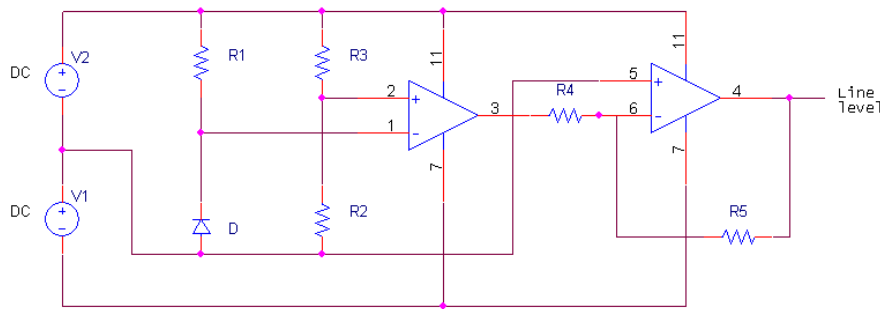
$$R_{max} = 2f_c. \quad (6.1)$$

Voor deze sensor bedraagt de maximale waarneembare bitsnelheid $R_{max} = 5\text{Mbit/s}$, wanneer OOK- modulatie wordt toegepast. Omdat deze sensor op het tijdstip van de metingen niet voorhanden was, is er een BPW14 fototransistor gebruikt [57]. Deze heeft een piek spectrale gevoeligheid λ_p bij 780nm en een relatieve spectrale gevoeligheid van $0.4\lambda_p$ bij 450nm. De *cutoff* frequentie f_c bedraagt 170kHz, bitsnelheden tot maximaal 340kbit/s zijn hiermee detecteerbaar. Omdat een fototransistor als een fotodiode gezien kan worden met interne versterking, kunnen we voor de fototransistor hetzelfde circuit gebruiken als voor de fotodiode.

Een circuit moet achter de fotodiode/fototransistor geplaatst worden om de stromen van de diode/transistor om te zetten naar line-in compatibele signalen. Een mogelijke implementatie van een dergelijk circuit gebruikmakend van opamps, is weergegeven in Fig. 6.1.

Indien er geen licht op de fotodiode/fototransistor D valt zal er een zeer kleine *dark current* I_D in de orde van enkele pA door $R1$ lopen. De kleine spanningsval over $R1$ zal de inverterende ingang V_- van opamp 1 een potentiaal van een fractie lager dan 5V hebben. Omdat geldt dat $V_- > V_+$, heeft de uitgang van opamp 1 een potentiaal van -15V. Wordt D nu belicht dan zal er een stroom lopen door $R1$ waardoor de spanningval hierover zorgt dat het potentiaal op de inverterende ingang V_- van opamp 1 daalt. De spanningsdeler rond $R2$ en $R3$ is zo gedimensioneerd dat een redelijke belichtingssterkte ervoor zorgt dat $V_- < V_+$, met als gevolg dat de uitgang van opamp 1 rond de 15V komt te liggen. Een tweede opamp geschakeld als een inverterende versterker, verzwakt het signaal met een factor 50 om zo line-in niveaus te kunnen uitsluiten. De weerstanden $R4$ en $R5$ worden berekend met:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_5}{R_4} \quad (6.2)$$



Figuur 6.1: Ontvanger circuit

In MatLab wordt een datareeks van 1000 willekeurige bytes gegenereerd die geëxporteerd wordt naar het RS232 kanaal van het *proof of principle*. Het signaal dat door de sensor van het detectorcircuit wordt ontvangen, wordt in line-in niveau aangeboden aan de geluidskaart van de PC. Deze doet een audio-opname van het signaal en slaat het bestand op als een .wav file. Tenslotte wordt een vergelijking gedaan met de uitgezonden data en wordt de BER berekend.

Om de robuustheid van het *proof of principle* te testen, kunnen verschillende configuraties gebruikt worden tijdens het testen. Zo kan de hoeveelheid omgevingslicht en de datasnelheid aangepast worden en kan de afstand tussen de ledverlichting en het detectorcircuit vergroot worden.

Tijdens het uitvoeren van deze test bleek dat de geluidskaart van de PC een AC-gekoppelde ingang bezit. Hierdoor werd het ingangssignaal dermate vervormd dat deze niet meer geschikt was voor analyse. In plaats van de geluidskaart kan beter een data-aquisitiekaart gebruikt worden. Die was echter niet aanwezig op het tijdstip van de metingen.

6.2 Overstap naar Proof of Concept

Om een systeem te ontwerpen dat uiteindelijk geïmplementeerd moet worden in een warenhuis is een *proof of concept* niet voldoende. Een volgende stap in het ontwerpproces is de

overgang naar een *proof of concept*. Het resultaat van die overgang is een prototype dat bij terugkoppeling aan het PvE helemaal voldoet aan alle eisen. Dit betekent niet dat het systeem daarom helemaal bedrijfsklaar is, maar dit houdt wel in dat alle vooropgestelde criteria gehaald zijn. Bij evaluatie van het *proof of concept* kan geopperd worden om bepaalde eisen uit het PvE aan te passen of toe te voegen en vervolgens een tweede versie van dat prototype te bouwen. Dit proces kan herhaaldelijk doorlopen worden tot een product ontstaat waar zowel producent als consument tevreden mee zijn.

Hoofdstuk 7

Conclusie en aanbevelingen

In dit ontwerprapport wordt een zendsysteem ontwikkeld voor LED-pricing. Met een *proof of principle* voor het volledige systeem is VLC aangetoond over een afstand van 42cm met een datasnelheid van 10 kbit/s. Voor een implementatie in een warenhuis is tenminste 6 kbit/s nodig om 65536 binnen 1 uur te updaten. Er moet in die situatie ook transmissie kunnen plaatsvinden over de grootste afstand tussen een prijskaartje en de meest nabije ledverlichting. Het *proof of principle* kan twee individuele prijskaartjes aansturen die het principe van meervoudige ontvangers duidelijk maken.

Aan de zenderkant van het systeem is MatLab software geschreven die een GUI implementeert, een RS232 protocol die een link maakt tussen een terminal en het lichtnet. Het implementeren van de PLCM was niet succesvol, deze schakelis daarom niet opgenomen in het zendsysteem. Er is een MOSFET schakeling gebouwd die een *off-the-shelf* led-buis aanstuurt. Als test van het zendsysteem is een detectorcircuit gebouwd dat uitgelezen wordt met een geluidskaart van een PC. De data werden vervolgens in MatLab vergeleken met de uitgestuurde data. Omwille van de eigenschappen van de geluidskaart zijn geen succesvolle metingen uitgevoerd. Er is ook een voorstel gedaan om de robuustheid van het systeem te testen.

In het *proof of concept* is aangestipt dat het *proof of principle* slechts een eerste stap is in de richting van een commercieel product. De grootste *bottleneck* in het prototype is de afstand waarover transmissie plaatsvindt. Om van een realistisch ontwerp te kunnen spreken, moet de transmissieafstand vergroten naar lengtes zoals die gebruikelijk zijn in warenhuizen. Ook de communicatie via het lichtnet blijkt nog een flinke stap voorwaarts nodig te hebben in het ontwerp om aan te tonen dat het een haalbaar concept is voor LED-pricing.

Lijst van figuren

2.1	Luminantie spectrum van een typische witte OYGB led [13]	10
3.1	Topologie van het systeem	15
3.2	User interface blokdiagram	18
3.3	Link blokdiagram	20
3.4	PLCM blokdiagram	22
3.5	Verificatie blokdiagram	24
3.6	Modulatie blokdiagram	26
3.7	Aansturing blokdiagram	28
3.8	Ledverlichting blokdiagram	30
4.1	Schematische weergave van de user interface	31
4.2	Buck converter met modulatie [46]	37
4.3	Buck converter met uitgebreide terugkoppeling [45]	37
4.4	Uitgezonden lichtspectra van een witte led en TL	38
5.1	GUI — <i>LEDsoft.m</i>	41
5.2	Typische RS232 golfvorm	42
5.3	Afbeelding van het PLC-circuit	43
5.4	Topologie van de aansturing.	45
5.5	Schematische weergave van de ledverlichting	46
6.1	Ontvanger circuit	48
7.1	Gantt chart	68
7.2	PERT chart	68

Lijst van tabellen

3.1	User interface koppelingen	18
3.2	User interface prioriteiten	18
3.3	Link koppelingen	20
3.4	Link prioriteiten	20
3.5	PLCM koppelingen	22
3.6	PLCM prioriteiten	22
3.7	Verificatie koppelingen	24
3.8	Verificatie prioriteiten	24
3.9	Modulatie koppelingen	26
3.10	Modulatie prioriteiten	26
3.11	Aansturing koppelingen	28
3.12	Aansturing prioriteiten	28
3.13	Ledverlichting koppelingen	30
3.14	Ledverlichting prioriteiten	30
4.1	Overzicht van mogelijke modaliteiten	32
4.2	Mogelijke programmeertalen voor GUI implementatie	32
4.3	Vergelijking protocollen voor link [30],[31],[32]	33
4.4	Vergelijking technieken voor PLCM [26],[33][24]	34
4.5	Vergelijking microcontrollers [38],[39],[40],[41],[42]	35
4.6	Vergelijking van aansturingen [43],[44]	36
4.7	Vergelijking type LEDs	39

Lijst van veel gebruikte termen

AC Alternating Current
ASCII American Standard Code for Information Interchange
AWGR Additieve Witte Gausische Ruis
BEP Bachelor Eind Project
BER Bit Error Rate
CCITT Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique
CDMA Code Division Multiple Access
CRC Cyclic Redundancy Check
DC Direct Current
D-LED Data-Light Emitting Diode
EN Europese Norm
EM Elektro Magnetisch
FEC Forward Error Correction
FOV Field of View
GUI Graphical User Interface
IPS Instructions Per Second
IR Infra Rood
ISI Inter Symbol Interference
I/O In/Out
LDR Light Dependent Resistor
LOS Line of Sight
LPT Line Print Terminal
MTTF Mean Time To Failure
NEN Nederlands Normalisatie-instituut
OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OOK-RZ On Off Keying-Return to Zero
OYGB Orange Yellow Green Blue
PC Personal Computer
PCE Phosphor Conversion Efficiency

PLC Poweline Communication
PLCM Powerline Carrier Modem
POLA Priniciple of Least Astonishment
PSD Power Spectral Density
PvE Programma van Eisen
RAM Random Access Memory
RF Radio Frequency
RGB Red Green Blue
RoHS Restriction of Hazardous Substances
SGC Spectral Gravity Center
SNR Signal to Noise Ratio
SSL Smart Shelf Label
UART Universal Asynchonous Receiver/Transmitter
UHB Ultra High Brightness
UPB Universal Poweline Bus
USB Universal Serial Bus
VLC Visible Light Communication

Bibliografie

- [1] B. R. Muqing Liu and H. W. M. Salemin, “Evaluation of led application in general lighting,” *Optical engineering*, vol. 46, no. 7, jul 2007.
- [2] T. Komine and M. Nakagawa, “Fundamental analysis for visible-light communication system using led lights,” *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 50, no. 1, pp. 100 – 107, feb 2004.
- [3] LEDSpeak, *Businessplan: LEDSpeak*, 2011.
- [4] T. Komine, J. H. Lee, S. Haruyama, and M. Nakagawa, “Adaptive equalization system for visible light wireless communication utilizing multiple white led lighting equipment,” *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 6, pp. 2892 –2900, june 2009.
- [5] T. Komine and M. Nakagawa, “Performance evaluation of visible-light wireless communication system using white led lightings,” in *Computers and Communications, 2004. Proceedings. ISCC 2004. Ninth International Symposium on*, vol. 1, june-1 july 2004, pp. 258 – 263 Vol.1.
- [6] —, “Fundamental analysis for visible-light communication system using led lights,” *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 50, no. 1, pp. 100 – 107, feb 2004.
- [7] D. Deqiang, K. Xizheng, and X. Linpeng, “An optimal lights layout scheme for visible-light communication system,” in *Electronic Measurement and Instruments, 2007. ICEMI '07. 8th International Conference on*, 16 2007-july 18 2007, pp. 2–189 –2–194.
- [8] G. Pang, T. Kwan, H. Liu, and C.-H. Chan, “Optical wireless based on high brightness visible leds,” in *Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE*, vol. 3, 1999, pp. 1693 –1699 vol.3.
- [9] G. Pang, “Information technology based on visible leds for optical wireless communications,” in *TENCON 2004. 2004 IEEE Region 10 Conference*, vol. B, nov. 2004, pp. 395 – 398 Vol. 2.
- [10] J. H. Choi, S. W. Koo, and J. Y. Kim, “Influence of optical path difference on visible light communication systems,” in *Communications and Information Technology, 2009. ISCIT 2009. 9th International Symposium on*, sept. 2009, pp. 1247 –1251.
- [11] D. Deqiang, K. Xizheng, and X. Linpeng, “An optimal lights layout scheme for visible-light communication system,” in *Electronic Measurement and Instruments, 2007. ICEMI '07. 8th International Conference on*, 16 2007-july 18 2007, pp. 2–189 –2–194.
- [12] J.-P. Linnartz, L. Feri, H. Yang, S. Colak, and T. Schenk, “Communications and sensing of illumination contributions in a power led lighting system,” in *Communications, 2008. ICC '08. IEEE International Conference on*, may 2008, pp. 5396 –5400.

- [13] Y. Uchida and T. Taguchi, "Lighting theory and luminous characteristics of white light-emitting diodes," *Optical Engineering*, no. 44, pp. 167 – 171, dec. 2005.
- [14] F. Xiansong, N. Pingjuan, X. Wencui, T. Haitao, and H. Chen, "Design and properties analysis of a single-chip white ingan/gan led," in *Information Networking and Automation (ICINA), 2010 International Conference on*, vol. 2, oct. 2010, pp. V2–413 –V2–416.
- [15] S. Muthu, F. Schuurmans, and M. Pashley, "Red, green, and blue led based white light generation: issues and control," in *Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the*, vol. 1, 2002, pp. 327 – 333 vol.1.
- [16] Y. Narukawa, M. Sano, M. Ichikawa, S. Minato, T. Sakamoto, T. Yamada, and T. Mukai, "Improvement of luminous efficiency in white light emitting diodes by reducing a forward-bias voltage," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 46, no. 40, pp. L963–L965, 2007. [Online]. Available: <http://jjap.jsap.jp/link?JJAP/46/L963/>
- [17] K. Lee and S. Lee, "Process development for yellow phosphor coating on blue light emitting diodes (leds) for white light illumination," in *Electronics Packaging Technology Conference, 2006. EPTC '06. 8th*, dec. 2006, pp. 379 –384.
- [18] Z. Wu, J. Shi, J. Wang, M. Gong, and Q. Su, "A novel blue-emitting phosphor $\text{LiSrPO}_4:\text{Eu}^{2+}$ for white leds," *Journal of Solid State Chemistry*, vol. 179, no. 8, pp. 2356 – 2360, 2006, von Schnering 75th Birthday. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022459606002489>
- [19] N. Narendran and Y. Gu, "Life of led-based white light sources," *Display Technology, Journal of*, vol. 1, no. 1, pp. 167 – 171, sept. 2005.
- [20] M. AbuElHassan and R. Ngah, "Secured indoor powerline communication using cdma technique," in *Applied Electromagnetics, 2007. APACE 2007. Asia-Pacific Conference on*, dec. 2007, pp. 1 –5.
- [21] A. Rajesh and R. Nakkeeran, "Performance analysis of integrated system under impulse noise and multipath channel using turbo coded ofdm," in *Advanced Computing and Communications, 2008. ADCOM 2008. 16th International Conference on*, dec. 2008, pp. 254 –259.
- [22] Q. Liu and Q.-A. Zeng, "Multi-band ofdm and p-persistent csma/cd-based indoor powerline communication (plc) systems," in *Ubiquitous and Future Networks, 2009. ICUFN 2009. First International Conference on*, june 2009, pp. 235 –239.
- [23] J. Nguimbis, X. Jiang, and S. Cheng, "Noise characteristics investigation and utilization in low voltage powerline communication," in *Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE*, vol. 3, jan 2000, pp. 2035 –2040 vol.3.
- [24] K. Afkhamie, S. Katar, L. Yonge, and R. Newman, "An overview of the upcoming homeplug av standard," in *Power Line Communications and Its Applications, 2005 International Symposium on*, april 2005, pp. 400 – 404.
- [25] M. Hazen, "The technology behind homeplug av powerline communications," *Computer*, vol. 41, no. 6, pp. 90 –92, june 2008.
- [26] V. Oksman and S. Galli, "G.hn: The new itu-t home networking standard," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 47, no. 10, pp. 138 –145, october 2009.
- [27] J. Nguimbis, S. Cheng, Y. Zhang, and L. Xiong, "Coupling unit topology for optimal signaling through the low-voltage powerline communication network," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 19, no. 3, pp. 1065 – 1071, july 2004.

- [28] M.M.Bekker, *An analysis of user interface design practice*, 1995.
- [29] D. Borota and B. Jansen, “Vergelijking en implementatie van digitale signaalbewerkingstechnieken bij communicatie via leds,” 2011.
- [30] *Datasheet: Universal Serial Bus Specification*.
- [31] *Datasheet: Fundamentals of RS232 Serial Communications*.
- [32] *Datasheet: Comparing Bus Solutions*.
- [33] *Datasheet: UPB Technology Description*.
- [34] Z. Yuejun and W. Mingguang, “Design of wireless remote module in x-10 intelligent home,” in *Industrial Technology, 2005. ICIT 2005. IEEE International Conference on*, dec. 2005, pp. 1349–1353.
- [35] *Datasheet: Standard and Extended X10 Code Protocol*, <http://software.x10.com/pub/manuals/xtddcode.pdf>.
- [36] R. Riva, M. Odoni, E. Guerrini, and P. Bisaglia, “Improved homeplug av channel estimation exploiting sounding procedure,” in *Power Line Communications and Its Applications, 2009. ISPLC 2009. IEEE International Symposium on*, 29 2009–april 1 2009, pp. 296–300.
- [37] J. E. McNamara, *Technical Aspects of Data Communication*, second edition ed. USA: Digital Press, 1982.
- [38] *Datasheet: 8-bit 80C51 5 V low power 64 kB Flash microcontroller with 1 kB RAM*.
- [39] *Datasheet: High-performance, Low-power Atmel AVR 8-bit Microcontroller ATmega8*.
- [40] *Datasheet: 8-bit Microcontroller with 2K Bytes In-System Programmable Flash ATtiny2313/V*.
- [41] *Datasheet: 8-bit Microcontroller with 8K/16K Bytes In-System Programmable Flash and LIN Controller ATtiny87*.
- [42] *Datasheet: PIC16F685/687/689/690 20-Pin Flash-Based, 8-Bit CMOS Microcontrollers with nanoWatt Technology*.
- [43] S. Winder, *Power Supplies for LED Drivers*. USA: Elsevier, 2008.
- [44] —, *Power Supplies for LED Drivers*. USA: Elsevier, 2008.
- [45] D. Gacio, J. Alonso, J. Garcia, L. Campa, M. Crespo Ramos, and M. Rico-Secades, “Pwm series dimming for slow-dynamics hpf led drivers: the high frequency approach,” *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. PP, no. 99, p. 1, 2011.
- [46] H. van der Broeck, G. Sauerlander, and M. Wendt, “Power driver topologies and control schemes for leds,” in *Applied Power Electronics Conference, APEC 2007 - Twenty Second Annual IEEE*, 25 2007–march 1 2007, pp. 1319–1325.
- [47] B. Heffernan, L. Frater, and N. Watson, “Led replacement for fluorescent tube lighting,” in *Power Engineering Conference, 2007. AUPEC 2007. Australasian Universities*, dec. 2007, pp. 1–6.
- [48] *Datasheet: ”Luxeon Rebel Illumination Portfolio”*, 2011, <http://www.philipslumileds.com/products/luxeon-rebel/luxeon-rebel-white>.
- [49] R. Pinto, M. Cosetin, T. Marchesan, M. da Silva, G. Denardin, J. Fraytag, A. Campos, and R. do Prado, “Design procedure for a compact lamp using high-intensity leds,” in *Industrial Electronics, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE*, nov. 2009, pp. 3506–3511.

- [50] J. E. McNamara, *Technical Aspects of Data Communication*, second edition ed. USA: Digital Press, 1982.
- [51] J. Newbury, "Communication requirements and standards for low voltage mains signalling," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 13, no. 1, pp. 46–52, jan 1998.
- [52] *Datasheet: TDA5051*, 1997, <http://www.datasheetcatalog.com/datasheets-pdf/T/D/A/5/TDA5051.shtml>.
- [53] *Datasheet: "2N3904"*, 1999, <http://www.datasheetcatalog.com/datasheets-pdf/2/N/3/9/2N3904.shtml>.
- [54] *Datasheet: IRFZN44N*, 2001, <http://www.datasheetcatalog.com/datasheets-pdf/I/R/F/Z/IRFZ44N.shtml>.
- [55] *Datasheet: "OMT5D1FT - LED T5 LIGHT TUBE"*, <http://www.farnell.com/datasheets/90826.pdf>.
- [56] *Datasheet: "EPD-470"*, 2007. [Online]. Available: <http://www.ic-on-line.cn/view-online.php?id=1373495file=0206-470-5-05-4617370.pdf>
- [57] *Datasheet: "BPW14"*, 1977. [Online]. Available: <http://www.datasheetarchive.com/BPW14-datasheet.html>

Appendices

A assembler code

```
;---MAIN SENDER PROGRAM---
;R1 = DATA
;R2 = COUNTER
;R5 = MODULATION

                ORG     0000H
                LJMP    start

                ORG     000BH                    ;T0 interrupt vector
                LJMP    t0int

                ORG     02BH                    ;T2 interrupt
                LJMP    t2int

                ORG     0050H

start          SETB     91H                    ;set output P1.1
               SETB     0AFH                    ;global interrupt enable
               MOV      8BH,#0FAH                ;set TL1, baud
               MOV      8DH,#0FAH                ;set baud 4800
               MOV      98H,#52H                ;set SCON
               MOV      89H,#20H                ;set TMOD
               SETB     8EH                    ;start T1
rec_mod        JNB      98H,rec_mod              ;wacht op receive flag
               CLR      98H                    ;clear receive flag
               MOV      R5,99H                    ;data in R5
               CJNE     R5,#01H,c_pwm            ;00K geselecteerd
               SJMP     ook
c_pwm          CJNE     R5,#02H,c_ppm            ;PWM geselecteerd
               SJMP     pwm
c_ppm          CJNE     R5,#03H,err              ;PPM geselecteerd
               SJMP     ppm
err            SJMP     err                    ;error

;---HOOFDLUSSEN---
```

```

ook      JNB      98H,ook          ;wacht op receive flag
          CLR      98H             ;clear receive flag
          MOV      R1,99H          ;data naar R1
          LCALL    send_ook        ;verzend byte
          SJMP     ook

pwm      JNB      98H,pwm          ;wacht op receive flag
          CLR      98H             ;clear receive flag
          MOV      R1,99H          ;data naar R1
          LCALL    send_pwm        ;verzend byte
          SJMP     pwm

ppm      JNB      98H,ppm          ;wacht op receive flag
          CLR      98H             ;clear receive flag
          MOV      R1,99H          ;data naar R1
          LCALL    send_ppm        ;verzend byte
          SJMP     ppm

;---INTERRUPT SWITCH---
t2int    CJNE     R5,#01H,c_pwmi2   ;OOK geselecteerd
          LJMP     t2ookint
c_pwmi2   CJNE     R5,#02H,c_ppmi2   ;PWM geselecteerd
          LJMP     t2pwmint
c_ppmi2   CJNE     R5,#03H,err       ;PPM geselecteerd
          LJMP     t2ppmint

t0int     CJNE     R5,#02H,c_ppmi0   ;PWM geselecteerd
          LJMP     t0pwmint
c_ppmi0   CJNE     R5,#03H,err       ;PPM geselecteerd
          LJMP     t0ppmint

;---OOK FILE---
send_ook  MOV      R0,#80H           ;r0 = 10000000 mask
          MOV      R2,#00H           ;r2 = 0 counter
          ;CLR      C                ;clear carry
          MOV      0C8H,#00H         ;set T2CON
          MOV      0C9H,#00H         ;set T2MOD
          MOV      0CCH,#000H        ;set TL2
          MOV      0CDH,#0FEH        ;set TH2
          MOV      0CAH,#000H        ;set RCAP2L
          MOV      0CBH,#0FEH        ;set RCAP2H
          SETB     0ADH              ;enable T2 int
          SETB     0CAH              ;start T2
          CLR      91H               ;clear output P1.1
loop_ook  MOV      A,R1              ;accu = data
          ANL      A,R0              ;A = A AND mask
          CJNE     R2,#08H,loop_ook   ;8 bits verzonden?
          CLR      0ADH              ;disable T2 int
loop1_ook JNB      0CFH,loop1_ook     ;wacht tot laatste bit verzonden
          SETB     91H               ;set output P1.1
          CLR      0CFH              ;clear ovfl flag

```

```

        CLR      OCAH                      ;stop T2
        RET

;---OOK INTERRUPT, T2---
t2ookint PUSH    OD0H                      ;PSW
        CLR      OCFH                      ;clear ovfl flag
        JZ       zero_ook                  ;A = 0?
        SETB     91H                      ;set output P1.1
        SJMP     one_ook
zero_ook CLR      91H                      ;clear output P1.1
one_ook  MOV      A,R0                      ;A = mask
        RR       A                        ;rotate right
        MOV      R0,A                      ;mask = A
        INC      R2                      ;counter + 1
        POP      OD0H                    ;PSW
        RETI

;---PWM FILE---
send_pwm MOV      R0,#80H                  ;r0 = 10000000 mask
        MOV      R3,#00H                  ;r3 = 0 counter
        CLR      C                        ;clear carry
        MOV      0C8H,#00H                ;set T2CON
        MOV      A,89H                    ;A = TMOD
        ORL      A,#01H                   ;A = A OR 01
        MOV      89H,A                    ;TMOD = A
        MOV      0C9H,#00H                ;set T2MOD
        MOV      0CCH,#00H                ;set TL2
        MOV      OCDH,#00H                ;set TH2
        MOV      OCAH,#00H                ;set RCAP2L
        MOV      OCBH,#00H                ;set RCAP2H
        SETB     0ADH                      ;enable T2 int
        SETB     0A9H                      ;enable T0 int
        SETB     OCAH                      ;start T2
loop_pwm MOV      A,R1                      ;accu = data
        ANL      A,R0                      ;A = A AND mask
        CJNE     R3,#09H,loop_pwm          ;wacht tot 8 bits verzonden
        CLR      8CH                      ;stop T0
        CLR      OCAH                      ;stop T2
        CLR      0ADH                      ;disable T2 int
        CLR      0A9H                      ;disable T0 int
        RET

;---PWM INTERRUPT, T2---
t2pwmint PUSH    OD0H                      ;PSW
        SETB     91H                      ;set output P1.1
        CPL      97H                      ;maakt frame zichtbaar P1.7
        CLR      OCFH                      ;clear T2 ovfl flag
        JZ       zero_pwm                  ;bit = 0?
        MOV      8AH,#0BBH                ;set TL0(1)1

```

```

        MOV      8CH,#0CCH                ;set TH0(1)1
        SJMP     one_pwm
zero_pwm MOV      8AH,#70H                ;set TL0(1)0
        MOV      8CH,#70H                ;set TH0(1)0
one_pwm  SETB     8CH                    ;start T0
        INC      R3                      ;counter + 1
        POP      0D0H                   ;PSW
        RETI

;---PWM INTERRUPT, TO---
t0pwmint PUSH    0D0H                   ;PSW
        CLR      8CH                    ;stop T0
        CLR      91H                    ;clear output P1.1
        MOV      A,R0                   ;A = mask
        RR       A                      ;rotate right
        MOV      R0,A                   ;R0 = A
        POP      0D0H                   ;PSW
        RETI

;---PPM FILE---
send_ppm MOV      R0,#80H                ;r0 = 10000000 mask
        MOV      R3,#00H                ;r3 = 0
        MOV      R2,#00H                ;clear flag
        CLR      C                      ;clear carry
        MOV      0C8H,#00H              ;set T2CON
        MOV      A,89H                  ;A = TMOD
        ORL      A,#01H                  ;A = A OR 01
        MOV      89H,A                  ;TMOD = A
        MOV      0C9H,#00H              ;set T2MOD
        MOV      0CCH,#00H              ;set TL2
        MOV      OCDH,#00H              ;set TH2
        MOV      OCAH,#00H              ;set RCAP2L
        MOV      OCBH,#00H              ;set RCAP2H
        SETB     0ADH                    ;enable T2 int
        SETB     0A9H                    ;enable T0 int
        SETB     0CAH                    ;start T2
loop_ppm MOV      A,R1                   ;accu = data
        ANL      A,R0                   ;A = A AND mask
        CJNE     R3,#09H,loop_ppm        ;wacht tot 8 bits verzonden
        CLR      8CH                    ;stop T0
        CLR      OCAH                    ;stop T2
        CLR      0ADH                    ;disable T2 int
        CLR      0A9H                    ;disable T0 int
        RET

;---PPM INTERRUPT, T2---
t2ppmint PUSH    0D0H                   ;PSW
        CPL      97H                    ;maakt frame zichtbaar P1.7
        CLR      0CFH                    ;clear T2 ovfl flag

```

```

        JZ      zero_ppm          ;bit = 0?
        MOV     8AH,#0BBH        ;set TL0(1)1
        MOV     8CH,#0CCH        ;set TH0(1)1
zero_ppm MOV     8AH,#70H          ;set TL0(1)0
        MOV     8CH,#70H          ;set TH0(1)0
one_ppm  SETB    8CH              ;start T0
        INC     R3                ;counter + 1
        POP     0D0H              ;PSW
        RETI

;---PPM INTERRUPT, TO---
tOppmint PUSH    0D0H              ;PSW
        CLR     8CH              ;stop T0
        CJNE    R2,#00H,twee_ppm ;jump als 2e int
        CLR     91H              ;clear output P1.1
        MOV     R2,#OFFH          ;set flag
        MOV     8AH,#0AAH          ;set TL0(2)
        MOV     8CH,#0AAH          ;set TH0(2)
        SJMP    een_ppm
twee_ppm SETB    91H              ;set output P1.1
        MOV     R2,#00H          ;clear flag
        MOV     A,R0              ;A = mask
        RR      A                 ;rotate right
        MOV     R0,A              ;R0 = A
een_ppm  SETB    8CH              ;start T0
        POP     0D0H              ;PSW
        RETI
END

```


B MatLab code

Listing 7.1: LEDsoft

```
1 function varargout = LEDsoft(varargin)
2
3 % Begin initialization code - DO NOT EDIT
4 gui_Singleton = 1;
5 gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
6                   'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
7                   'gui_OpeningFcn', @LEDsoft_OpeningFcn, ...
8                   'gui_OutputFcn',  @LEDsoft_OutputFcn, ...
9                   'gui_LayoutFcn',  [], ...
10                  'gui_Callback',    []);
11 if nargin && ischar(varargin{1})
12     gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
13 end
14
15 if nargout
16     [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
17 else
18     gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
19 end
20 % End initialization code - DO NOT EDIT
21
22
23 % — Executes just before LEDsoft is made visible.
24 function LEDsoft_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
25 handles.output = hObject;
26
27 % Update handles structure
28 guidata(hObject, handles);
29
30
31
32 % — Outputs from this function are returned to the command line.
33 function varargout = LEDsoft_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
34 varargout{1} = handles.output;
35
36
37 % — Executes on selection change in baud.
38 function popupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)
39 guidata(hObject, handles);
40
41
42 % — Executes during object creation, after setting all properties.
43 function popupmenu1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
44 if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'), get(0, '
    defaultUicontrolBackgroundColor'))
45     set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
46 end
47
48
49 % — Executes on selection change in packets.
50 function popupmenu2_Callback(hObject, eventdata, handles)
51 guidata(hObject, handles);
52
53
54 % — Executes during object creation, after setting all properties.
55 function popupmenu2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```

56 if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'), get(0, '
    defaultUicontrolBackgroundColor'))
57     set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
58 end
59
60
61 % — Executes on selection change in crc.
62 function popupmenu3_Callback(hObject, eventdata, handles)
63 guidata(hObject, handles);
64
65
66 % — Executes during object creation, after setting all properties.
67 function popupmenu3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
68 if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'), get(0, '
    defaultUicontrolBackgroundColor'))
69     set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
70 end
71
72
73 % — Executes on button press in boot.
74 function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
75 baud = get(handles.popupmenu1, 'Value')
76 packetrate = get(handles.popupmenu2, 'Value')
77 crc = get(handles.popupmenu3, 'Value')
78 modulation = get(handles.popupmenu4, 'Value');
79 s = serial('COM1');
80 set(s, 'BaudRate', 4850)
81 set(s, 'DataBits', 8)
82 fopen(s);
83 fwrite(s, modulation, 'uint8', 'sync'); %—————
84 fclose(s);
85 delete(s);
86 guidata(hObject, handles);
87
88
89
90 % — Executes on button press in Transmit.
91 function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
92 baud = get(handles.popupmenu1, 'Value');
93 packetrate = get(handles.popupmenu2, 'Value');
94 crc = get(handles.popupmenu3, 'Value');
95 data1 = get(handles.edit3, 'String');
96 data2 = get(handles.edit4, 'String');
97 tag = str2double(get(handles.edit2, 'String'));
98 rs232(baud, data1, data2, crc, packetrate, tag)
99 guidata(hObject, handles);
100
101
102 % — Tag ID
103 function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)
104 guidata(hObject, handles);
105
106
107 % — Executes during object creation, after setting all properties.
108 function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
109 if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'), get(0, '
    defaultUicontrolBackgroundColor'))
110     set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
111 end
112
113
114 % — Executes on selection change in modulation.

```

```

115 function popupmenu4_Callback(hObject, eventdata, handles)
116
117
118
119 % — Executes during object creation, after setting all properties.
120 function popupmenu4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
121
122 if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'), get(0, '
    defaultUicontrolBackgroundColor'))
123     set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
124 end
125
126
127 % — First 16 data characters
128 function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)
129 % hObject    handle to edit3 (see GCBO)
130 % eventdata  reserved — to be defined in a future version of MATLAB
131 % handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
132
133 % Hints: get(hObject, 'String') returns contents of edit3 as text
134 %        str2double(get(hObject, 'String')) returns contents of edit3 as a
        double
135
136
137 % — Executes during object creation, after setting all properties.
138 function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
139
140 if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'), get(0, '
    defaultUicontrolBackgroundColor'))
141     set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
142 end
143
144
145 % — Second 16 data characters
146 function edit4_Callback(hObject, eventdata, handles)
147
148
149
150 % — Executes during object creation, after setting all properties.
151 function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
152
153 if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'), get(0, '
    defaultUicontrolBackgroundColor'))
154     set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
155 end

```

Listing 7.2: RS323

```

1 function rs232(baud, data1, data2, crc, packetrate, tag)
2 %card id      8
3 %header crc 8-ccitt 8
4 %ASCII start STX 8
5 %data 16*2    256
6 %ASCII stop ETX 8
7 %data crc 16-ccitt 16
8
9 frame = zeros(38,1);
10 frame(1) = tag;
11
12 %header CRC berekenen
13 %frame(2) = headercrc

```

```

14
15 frame(3) = 2;      %STX
16
17 a = '              ';
18 b = '              ';
19 a(1:length(data1)) = data1;
20 b(1:length(data2)) = data2;
21 frame(4:19) = double(a);
22 frame(20:35) = double(b);
23
24 frame(36) = 3;      %ETX
25
26 %data crc berekenen
27 %frame(37) = crc1
28 %frame(38) = crc2
29
30 %biframe = de2bi(frame(1));
31 %swapped = bi2de(biframe(end:-1:1));
32 for(j = 1:38) %XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
33 %j = 1; % XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
34 s = serial('COM1');
35 set(s, 'BaudRate', 4850)
36 set(s, 'DataBits', 8)
37 fopen(s);
38 fwrite(s, frame(j), 'uint8', 'sync'); %—————
39 pause(.1)
40 fclose(s);
41 delete(s);
42 end %XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
43
44 end

```

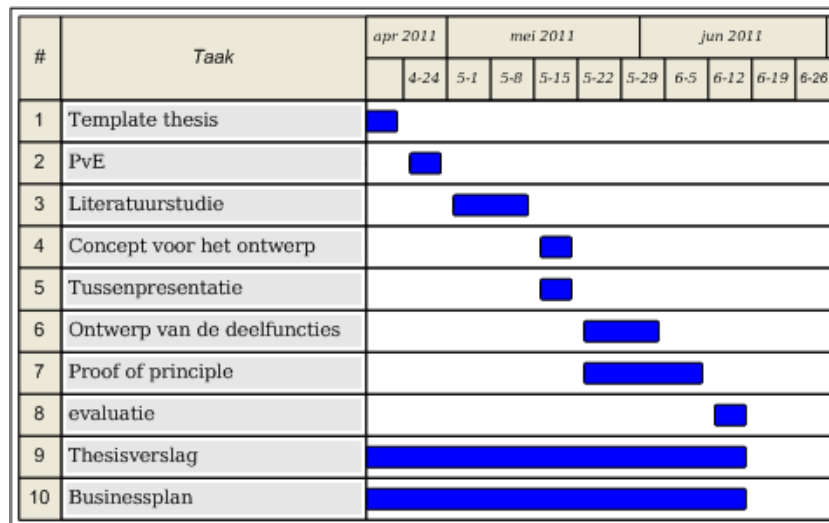
Listing 7.3: RS323

```

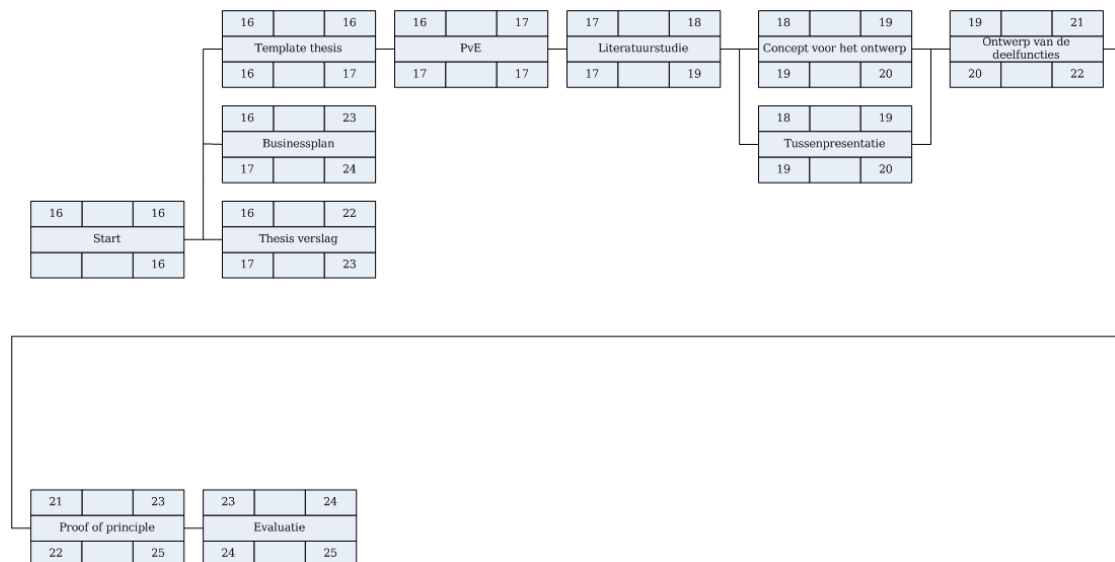
1 function checksum = crc(data, pol)
2 pol_leng = length(pol);
3 data = [data, zeros(1, pol_leng - 1)]; %Append data with zeros
4 data_leng = length(data);
5 a = find(data == 1);
6 i = a(1); %Index of first 1
7 while(i <= (data_leng - (pol_leng - 1)))
8     sum = pol + data(i:i+pol_leng-1);
9     prod = pol .* data(i:i+pol_leng-1); %XOR operation
10    temp = sum - 2*prod; %Update data string
11    data(i:i+pol_leng-1) = temp;
12    a = find(data == 1); %Find new index of first 1
13    i = a(1);
14 end
15 checksum = data(end-pol_leng+1:end);
16 end

```

C Gantt/PERT chart



Figuur 7.1: Gantt chart



Figuur 7.2: PERT chart