

2012•2013  
FACULTEIT BEDRIJFSECONOMISCHE WETENSCHAPPEN  
*master in de toegepaste economische wetenschappen:  
handelsingenieur: operationeel management en logistiek*

## Masterproef

Een economische analyse voor de investering in *printed electronics*.  
*Gevalstudie*. Lumoza NV

Promotor :  
Prof.dr.ir Steven VAN PASSEL

## Didier Strackx

*Masterproef voorgedragen tot het bekomen van de graad van master in de toegepaste  
economische wetenschappen: handelsingenieur, afstudeerrichting operationeel management  
en logistiek*

2012•2013

FACULTEIT BEDRIJFSECONOMISCHE  
WETENSCHAPPEN

*master in de toegepaste economische wetenschappen:  
handelsingenieur: operationeel management en logistiek*

## Masterproef

Een economische analyse voor de investering in *printed electronics*. *Gevalstudie*. Lumoza NV

Promotor :  
Prof.dr.ir Steven VAN PASSEL

**Didier Strackx**

*Masterproef voorgedragen tot het bekomen van de graad van master in de toegepaste economische wetenschappen: handelsingenieur, afstudeerrichting operationeel management en logistiek*



## Woord vooraf

Een thesis schrijven is een zwaar en intensief proces. Een heel aantal mensen hebben mij bijgestaan om dat proces tot een goed einde te brengen. Ten eerste zou ik Prof. Dr. Ir. Van Passel willen bedanken om mij de kans te geven om deze thesis aan te vatten. Samen met Sebastien Lizin heeft hij mij ook bijgestaan bij het tot een goed einde brengen van de verschillende stappen van mijn masterproef. Ik wil hen bedanken voor het advies, de toelichting van de materie en de extra informatie die ik van hen kreeg.

Dan wil ik ook Wouter Moons in het bijzonder bedanken om het mogelijk te maken mijn masterproef te maken in samenwerking met Lumoza. Dankzij hem heb ik de nodige informatie verkregen om de gevalstudie uit te voeren. Hij hielp mij met het accuraat in kaart brengen van het productieproces.

Tenslotte wil ik mijn ouders nog bedanken voor het nalezen van mijn masterproef. Dankzij hun steun gedurende mijn hele opleiding kon ik deze studierichting tot een goed einde brengen.

Didier Strackx,

Hasselt, augustus 2013



## Samenvatting

Een investeringsanalyse maken van een *printed electronics* productielijn, vergt ten eerste inzicht in enkele basisprincipes. Enerzijds bestaat dit uit een inleiding van wat *printed electronics* zijn en welke producttechnologieën beschikbaar zijn. Anderzijds bestaat het ook uit de economische facetten van de productielijn en hoe deze geëvalueerd worden.

In hoofdstuk 2 wordt toegelicht dat alle geprinte elektronica op substraten behoort tot de verzamelnaam *printed electronics*. Door de jaren heen hebben de *printed electronics* een grote evolutie doorgemaakt die leidde tot een heel aantal geprinte producttechnologieën. Drie van deze technologieën worden in hoofdstuk 6 uitgebreider toegelicht. De algemene voordelen van geprinte elektronica zijn dat ze het potentieel hebben om veel goedkoper te zijn dan conventionele elektronica. Doordat de geprinte producten licht en dun zijn en de mogelijkheid hebben tot printen op flexibele substraten, kan dit leiden tot een zeer groot aanbod aan nieuwe producten.

Het printproces wordt vervolgens in hoofdstuk 3 overlopen. Een groot gamma aan printtechnieken maakt het mogelijk om de eigenschappen van een bepaald printproces te koppelen aan de vereisten voor de productie van een bepaald product. Deze beslissing hangt ook nauw samen met de gekozen printtechnologie en de mate waarin *patterning* toegepast moet worden. Voor het economische belang is schaalbaarheid zeer belangrijk. In hoofdstuk 4 wordt dan ook gekeken naar hoe *roll-to-roll* processen werken. Een heel aantal printtechnieken kunnen in een *roll-to-roll* proces ingebracht worden. *Spin coating* is daar een van de uitzonderingen op. Dit is jammer omdat dit een printtechniek is waarbij de geprinte technologie vaak de beste resultaten oplevert. De verschillende technieken worden op het einde van dit hoofdstuk nog in twee overzichten geplaatst om de belangrijke eigenschappen duidelijk in kaart te brengen.

Voor twee andere productiestappen zijn nog een aantal keuzes te maken, namelijk de droger en de laminator. Deze twee stappen worden besproken in hoofdstuk 5. Als een heteluchtoven voldoet, dan wordt dit het vaakst gekozen omdat de aankoopprijs van de infrarood (IR)- en ultraviolet (UV)-drogers hoger ligt. Bij UV-drogers moeten de gebruikte inkten ook compatibel zijn (*UV-curable*) met de UV-technologie. Voor de laminatie bestaan eveneens meerdere opties, namelijk warme en koude laminatie en UV-curing. Ook hier ligt de prijs van een machine voor *UV-curing* hoger dan die van de laminators.

In hoofdstuk 6 worden de drie technologieën besproken. Ten eerste is dit elektroluminescentie of de *light emitting capacitor* (LEC). Dit is de technologie die ook aan bod komt in de *case study*. LEC werd het langst geleden ontdekt van de drie technologieën die besproken worden. Over elektroluminescentie is bijgevolg al veel onderzoek verschenen. De verschillende lagen van de basisstructuur worden ook besproken. Dit is interessant voor het printproces want daarbij worden de lagen meestal één voor één geprint. Vervolgens wordt toegelicht hoe kleuren bekomen worden. Verschillende actieve lagen hebben namelijk een verschillend spectrum. Door rode, groene en blauwe LEC's door elkaar te printen kunnen een heel aantal kleuren weergegeven worden. Een andere manier is door een actieve laag te kiezen, die wit licht uitzendt. Door aan de kant waar het licht de module verlaat een *red green blue* (RGB) filter te lamineren, kan een *full color*-scherm gemaakt worden. Om een concreet voorbeeld te krijgen van een van de toepassingsmogelijkheden van elektroluminescentie, wordt dit hoofdstuk afgesloten met het voorbeeld van een transparante display.

Voor de *organic light emitting diode* (OLED) en de *organic photovoltaics* (OPV) is ongeveer dezelfde opbouw behouden. Het zijn twee recentere technieken waar nog steeds veel onderzoek naar gedaan wordt. Voor de OLED's zijn twee grote stromingen ontstaan, namelijk de *small molecule* (SM)-OLED en de *polymer* LED. De SM-OLED heeft momenteel de bovenhand genomen omdat de prestaties hoger liggen dan bij de PLED. Een voordeel is echter wel dat PLED's printbaar zijn in een *roll-to-roll* proces en dus meer mogelijkheden biedt naar het goedkoop produceren van OLED-toepassingen. Als aandrijving om de verschillende *dots* in een scherm op te doen lichten zijn twee methoden ontwikkeld, de *active matrix* en de *passive matrix*. AMOLED's leveren een hogere efficiëntie en resolutie maar zijn ook duurder. De toepassing die besproken wordt voor de OLED is binnenhuisverlichting. Op termijn zou dit het verbruik van residentiële verlichting met vijftig procent kunnen doen afnemen.

Voor OPV zijn ook twee mogelijkheden die gedefinieerd worden door een verschillende structuur in de actieve laag. De ene structuur werkt met een acceptor-donorlaag en de andere werkt met bulk heterojunctie. Als toepassing van OPV is een lampje voor de derde wereld gekozen waarbij een stukje geprinte OPV de energie leverde aan het systeem. Het doel is een lampje met OPV te maken dat de dure petroleumlamp kan vervangen. Daarbij willen de onderzoekers een kostprijs per lampje dat rond de drie euro ligt.

In hoofdstuk 7 worden kort de economische instrumenten toegelicht die gebruikt worden in de *case study*. Ten eerste wordt de terugverdientijd uitgelegd. Dit is een eenvoudige

methode om na te gaan wanneer de toekomstige netto kasstromen de investeringskost zullen compenseren.

Vervolgens wordt de netto contante waarde (NCW) besproken. Deze methode houdt rekening met de tijdswaarde van geld of het rendement dat op de investering gehaald moet worden. Een cashflowtabel wordt opgesteld om de cashflowstromen per jaar in weer te geven en te verdisconteren naar het tijdstip van de investering.

De Monte Carlo simulatie is een methode om variatie in parameters te simuleren. Als verschillende parameters op een bepaald interval kunnen variëren, ontstaat bij elke run van willekeurige parameters binnen hun interval een nieuwe NCW. Om de resultaten van de gesimuleerde NCW's te resumeren, wordt een verdeling weergegeven. Op deze manier kan bijvoorbeeld nagegaan worden of het mogelijk is dat de NCW negatief wordt, of wat de kans daarop is.

Tot slot wordt de *case study* uitgevoerd in hoofdstuk 8. Eerst wordt een globaal beeld van Lumoza geschetst waarbij de oprichting als *spin-off* van de U Hasselt aan bod komt. Lumoza is vooral actief in de reclame- en de verpakkingsector. Vervolgens worden de investeringen die gemaakt moeten worden voor de hele productielijn toegelicht. Een *screen printer* (de grootste aankoopkost) wordt aangekocht met droger bij dezelfde leverancier. De laminator is een kleinere investering en tenslotte wordt ook een snijmachine aangekocht.

Het product waarop Lumoza in de toekomst gaat focussen is de banner. Voor de banner zijn vier verschillende formaten en zij vormen de basis tot de berekening van de inkomsten. Dan worden de verschillende processtappen overlopen aan de hand van hun operationele werking en inpassing in het productieproces. Dit vormt de basis voor de berekening van de totale procesduur en het aantal projecten dat op een jaar gerealiseerd kunnen worden.

Voor het NCW-model moeten de inkomsten en uitgaven in kaart worden gebracht. De inkomsten bestaan uit de verkopen van banners. Voor de uitgaven wordt een opdeling gemaakt tussen de variabele kosten die samenhangen met de productiegrootte en de vaste kosten. Na het overlopen van de kostenvariabelen, de discontovoet en de vennootschapsbelasting komen de resultaten aan bod.

De NCW van de totale investering geeft aan dat op 10 jaar de waarde van de investering groot is, ongeveer 1,4 miljoen euro. Dit geeft enigszins al aan dat de marge op parameters in het model waarschijnlijk vrij groot zal zijn. Om dit verder te onderzoeken



wordt een Monte Carlo analyse opgesteld met daarin alle variabelen die mogelijk kunnen variëren. Hieruit blijkt dat de verkoopprijzen en vooral de jaarlijkse groei in bezettingsgraad grote invloedrijke parameters zijn in het model. Ook met deze invloedrijke parameters blijft de NCW vrijwel grotendeels positief. Slechts in minder dan drie procent van de combinaties in de gekozen parameters werd de NCW negatief.

De twee meest invloedrijke variabelen werden dan verder onder de loep genomen in een statische analyse. De ondergrens van de prijs werd gezocht bij verschillende waarden in de jaarlijkse stijging in de bezettingsgraad. Als de jaarlijkse groei in bezettingsgraad nul zou zijn en dus de initiële bezetting aangehouden wordt, zal de NCW negatief worden. Dit zou recht gezet kunnen worden door de prijzen te laten stijgen met 2,8 procent.

Omdat in jaar 7 een bezetting van 100 procent bereikt wordt, kan de optie om een extra snijmachine aan te kopen onderzocht worden. Omdat de snijmachine de *bottleneck* is, kan de productie vergroten door een tweede snijmachine te kopen. Aan de hand van drie uitgewerkte scenario's blijkt dat de aankoopkost van de snijmachine in alle drie de scenario's terugverdiend kan worden. De NCW was namelijk drie maal positief

Een extra snijmachine aankopen bij volledige bezetting is dus een goede investeringsmogelijkheid. Een andere optie is gaan werken in twee posten op de eerste snijmachine en geen tweede snijmachine aan te kopen. Uit een NCW-analyse blijkt dat het werken in twee shiften een beter resultaat oplevert. Enkel bij het gebruik van een lagere discontovoet en als de termijn drastisch verlengt wordt, kan het eventueel voordeliger worden om de snijmachine aan te kopen.

# Inhoudsopgave

Woord vooraf .....	i
Samenvatting .....	iii
Inhoudsopgave .....	vii
Lijst van figuren .....	x
Lijst van tabellen .....	xi
1. Probleemstelling en centrale onderzoeksvraag .....	1
1.1 Probleemstelling.....	1
1.2 De centrale onderzoeksvraag .....	2
1.3 Deelvragen.....	3
2. <i>Printed electronics</i> .....	5
2.1 Inleiding .....	5
2.2 Definitie .....	5
3. Printprocessen .....	9
3.1 <i>Intaglio printing</i> .....	9
3.1.1 Matrijsdrukken of <i>casting</i> .....	9
3.2 <i>Lithographic printing</i> .....	10
3.3 <i>Rotary printing</i> .....	10
3.3.1 <i>Flexographic printing</i> .....	11
3.3.2 <i>Offset</i> .....	12
3.3.3 <i>(Roto)gravure printing</i> .....	14
3.4 <i>Spin coating</i> .....	15
3.5 <i>Screen printing</i> .....	16
3.6 <i>Ink jet printing</i> .....	18
3.7 <i>Doctor blading</i> .....	19
4. Procesintegratie of <i>roll-to-roll</i> productie .....	21
4.1 <i>Knife over edge en meniscus coating</i> .....	22

4.2	<i>Slot die coating</i> .....	22
4.3	<i>Gravure coating en flexographic printing</i> .....	23
4.4	<i>Curtain, multiple slot en slide coating</i> .....	24
4.5	Overzicht eigenschappen printtechnieken .....	26
5.	Droger en laminator .....	29
6.	Technologieën.....	31
6.1	Elektroluminescentie.....	31
6.1.1	Historiek .....	31
6.1.2	Basisstructuur en werking .....	32
6.1.3	Toepassing: transparante elektroluminescente applicaties .....	35
6.2	<i>Organic light emitting diode (OLED)</i> .....	36
6.2.1	Historiek .....	37
6.2.2	Basisstructuur en werking .....	37
6.2.3	Productie .....	38
6.2.4	AMOLED en PMOLED.....	39
6.2.5	<i>Full-color OLED</i> .....	39
6.2.6	Toepassing van witte OLED's voor binnenhuisverlichting .....	40
6.3	<i>Organic photovoltaics (OPV)</i> .....	41
6.3.1	Historiek .....	42
6.3.2	Basisstructuur en werking .....	42
6.3.3	Toepassing lamp met OPV.....	44
7.	Technieken voor het ondersteunen van de investeringsbeslissing .....	47
7.1	Terugverdiëntijd.....	47
7.2	De netto contante waarde .....	47
7.3	Monte Carlo simulatie .....	49
8.	Lumoza NV gevalstudie .....	51
8.1	Bedrijf en probleemstelling .....	51
8.2	Investeringen .....	51
8.3	Producten.....	52

8.4	Overzicht processen .....	55
8.4.1	Printer en droger.....	55
8.4.2	Laminator en snij- en freesmachine.....	55
8.4.3	Totale procesduur .....	56
8.5	Inkomsten en uitgaven .....	58
8.5.1	Inkomsten.....	58
8.5.2	Uitgaven .....	58
8.5.3	De discontovoet .....	63
8.5.4	Vennootschapsbelasting .....	63
8.6.1	<i>Cashflow</i> -tabel.....	65
8.6.2	Monte-Carlo analyse.....	68
8.7	De netto contante waarde van een extra snijmachine .....	72
8.7.1	Opstellen scenario's.....	73
8.7.2	NCW: <i>Average case</i> .....	74
8.7.3	NCW: <i>Worst case</i> .....	75
8.7.4	NCW: <i>Best case</i> .....	76
8.7.5	Gewogen gemiddelde NCW.....	76
8.7.6	Differentiële analyse .....	77
8.8	Conclusie gevalstudie .....	80
9.	Conclusie .....	83
10.	Lijst van geraadpleegde werken .....	87
11.	Bijlagen .....	95
11.1	Overzicht belangrijke assumpties .....	95

## Lijst van figuren

Figuur 1: Overzicht van <i>flexographic printing</i> . .....	11
Figuur 2: Overzicht van <i>lithographic printing</i> .....	12
Figuur 3: Overzicht van het <i>pad printing</i> proces. ....	13
Figuur 4: <i>Plate to plate</i> gravure printing. ....	14
Figuur 5: Overzicht van het <i>spin coating</i> proces. ....	15
Figuur 6: Een overzicht van het <i>screen printing</i> proces.....	17
Figuur 7: Een overzicht van elektrostatisch <i>Ink jet printing</i> .....	19
Figuur 8: De <i>doctor blading</i> techniek.....	20
Figuur 9: <i>Roll-to-roll</i> productie, discreet en geïntegreerd. ....	21
Figuur 10: <i>Slot die coating</i> .....	23
Figuur 11: Overzicht van <i>gravure printing</i> en <i>flexographic printing</i> bij <i>roll-to-roll</i> productie. ....	24
Figuur 12: Afbeelding van <i>Curtain coating</i> (links) en <i>slot coating</i> (rechts). ....	25
Figuur 13: Afbeelding van <i>multiple slot coating</i> (linksboven), <i>slide coating</i> (rechtsboven) en <i>curtain coating</i> (onder). ....	25
Figuur 14: Overzicht dimensionaliteit en contact van de printtechnieken. ....	26
Figuur 15: Basisstructuur LEC. ....	32
Figuur 16: <i>Patterning</i> bij full color OLED-schermen. ....	35
Figuur 17: Structuur transparante elektroluminescente display. ....	36
Figuur 18: Basisstructuur OLED.....	38
Figuur 19: Efficiëntie - Levensduur uitgezet ten opzichte van lichtintensiteit en een overzicht van de opbouw van MPE-OLED. ....	41
Figuur 20: Basisstructuren met a) acceptor- en donorlaag of b) bulk heterojunctie. ....	43
Figuur 21: Elektronische schakeling lampje met OPV. ....	44
Figuur 22: Lichtposter van de film <i>The green lantern</i> . ....	53
Figuur 23: Structuur LEC van Lumoza. ....	54
Figuur 24: Overzicht materiaalkosten en productiestappen. ....	59
Figuur 25: Het percentage per variabele dat de variatie in de NCW verklaart .....	70
Figuur 26: Verdeling NCW .....	71
Figuur 27 Grafiek <i>break even</i> verhoudingen aan de hand van het jaar en de discontovoet .....	81

## Lijst van tabellen

Tabel 1: Overzicht proceseigenschappen en vereisten van de verschillende printtechnieken. ....	27
Tabel 2: Overzicht van emissie van actieve fosforen. ....	34
Tabel 3: Investeringsbedragen .....	52
Tabel 4: Marges van de banners.....	53
Tabel 5: overzicht oppervlakte lichtdruk per banner.....	54
Tabel 6: Overzicht operationele uren per jaar en bezetting per machine .....	57
Tabel 7: Operationele kosten .....	60
Tabel 8: Loonkosten .....	61
Tabel 9: <i>Tooling</i> .....	61
Tabel 10: Kost extern aangekochte banner .....	62
Tabel 11: Vaste kosten.....	62
Tabel 12: Afschrijvingen en belastingstarief .....	64
Tabel 13: Netto contante waarde van het investeringsproject .....	67
Tabel 14: Kritische verkoopprijzen bij verschillende groeipercentages voor de bezettingsgraad .....	72
Tabel 15: Scenario's, extra bezetting en jaarmarges .....	73
Tabel 16 Netto contante waarde van de <i>average case</i> .....	74
Tabel 17: Netto contante waarde van de <i>worst case</i> .....	75
Tabel 18: Netto contante waarde van de <i>best case</i> .....	76
Tabel 19: Gewogen gemiddelde van de scenario's .....	76
Tabel 20: Netto contante waarde aankoop snijmachine ten opzichte van werken in twee shiften .....	77
Tabel 21: Perpetuïteit bij verschillende verdisconteringsvoeten. ....	79



# 1. Probleemstelling en centrale onderzoeksvraag

## 1.1 Probleemstelling

*Printed electronics* is een industrie in volle ontwikkeling. Veel multinationals en universiteiten voeren onderzoek naar *printed electronics*. De industrie heeft een groot potentieel waarbij er verwezen wordt naar bedragen tot tweehonderd miljard euro. (PERELAER, J., SMITH, P., et al., 2010)

De verwachtingen en de concurrentiepositie ten opzichte van traditionele elektronica zijn veelbelovend. *Printed electronics* staat voor het op de markt brengen van goedkope producten die vooral geschikt zijn voor massaproductie. Een voorbeeld hiervan is de ontwikkeling van een lampje voor de derde wereld. De energie voor de aandrijving van het lampje komt vanuit *organic photovoltaics*. (KREBS, F.C., NIELSEN, T.D., FYENBO, J., WADSTROM, M., et al., 2009) Geprinte (niet) organische residentiële lichtbronnen zijn ook een goedkoop alternatief voor de conventionele lampen en bieden ook een lager verbruik. Het komt er dus op aan om het productieproces op een performante wijze te organiseren zodat het potentieel eruit kan gehaald worden. Voor multinationals vormen deze factoren minder een probleem dan voor kleine of middelgrote ondernemingen (KMO). Middelgrote ondernemingen zullen beter moeten overwegen wat voor hen de juiste keuze is aangezien zij op een kleinere schaal zullen opereren dan multinationals. Het concentreren op marktsegmenten, waarbij hogere marges kunnen gerealiseerd worden, is cruciaal. In dit onderzoek wordt dus nagegaan of het economische verantwoord is voor een KMO om te investeren in een *printable electronics* productielijn. Aan de hand van een *case study* bij het bedrijf Lumoza wordt het literatuuronderzoek aan een praktijkvoorbeeld gekoppeld.

Lumoza NV maakte de keuze voor elektroluminescentie omwille van het uitgebreid draagvlak van onderzoek dat daarover reeds verschenen is. Nadat er in de opstartfase gekozen werd voor outsourcing, werd er overgeschakeld op het aankopen van een eigen productielijn.



## 1.2 De centrale onderzoeksvraag

Wat is de economische waarde van een investering in een productielijn voor *printed electronics*?

De onderzoeksvraag wordt enerzijds theoretisch benaderd door het onderzoeken van de verschillende technologieën die beschikbaar zijn voor *printed electronics*. De deelvragen geven een verder inzicht over de inhoud van de literatuurstudie.

Anderzijds, om de mogelijkheden van *printed electronics* in de praktijk te gaan bekijken, wordt er een *case study* uitgewerkt bij Lumoza NV.

### 1.3 Deelvragen

Om de centrale onderzoeksvraag te ondersteunen werden verschillende deelvragen opgesteld:

1. Wat zijn *printed electronics*?

Hoofdstuk 2

2. Welke printtechnieken zijn mogelijk en welke passen best bij een bepaalde technologie?

Hoofdstuk 3, 4

3. Wat zijn de andere processtappen?

Hoofdstuk 5

4. Welke producttechnologieën zijn mogelijk?

Hoofdstuk 6

5. Wat zijn de mogelijke instrumenten voor een economische analyse?

Hoofdstuk 7

6. *Case study*: Is een investering in een eigen productielijn voor elektroluminescente toepassingen economisch verantwoord?

Hoofdstuk 8



## 2. *Printed electronics*

### 2.1 Inleiding

Er zijn drie belangrijke revoluties voor printen doorheen de geschiedenis. De eerste kwam er met de ontdekking van de boekdrukkunst door Gutenberg in de 15<sup>e</sup> eeuw. In China waren daarvoor ook al enkele toepassingen gekend die hetzelfde concept, namelijk het drukken van ingekerfde objecten op een oppervlak, gebruikten. De echte doorbraak voor de westerse beschaving vond pas plaats bij de uitvinding van Gutenberg. De reden hiervoor was vooral terug te vinden in het feit dat Chinees niet op het alfabet gebaseerd is, maar eerder op symbolen. De tweede revolutie was de doorbraak van het internet en de persoonlijke printer die zijn groei vanaf begin jaren 90 inzette. Ondertussen is de derde revolutie in gang gezet. De combinatie van de wetenschap van het printen met die van de elektronica, chemie (voor de inkeigenschappen) en de digitale wereld zorgen voor het ontstaan van *printed electronics*. Deze industrie heeft enkele grote drijfveren ten opzichte van conventionele elektronica. Meer bepaald de lagere kosten, grotere doorvoer en de grotere productieschaal. (YLÖNEN, Y., NEUVONEN, S., 2010) Een andere tak van de laatste printrevolutie is het driedimensionaal printen (3-D printen). Hierbij worden de toepassingen digitaal ontworpen en door middel van printen uitgewerkt. Laag per laag worden de materialen geprint tot de beoogde toepassing gemaakt is. Het digitaal 3-D ontwerp wordt in feite omgezet naar 2-D lagen die dan geprint kunnen worden. Het wordt ook wel additieve manufacturing genoemd, omdat de andere technieken om complexe objecten te maken, gebruik maken van het weghalen van materie. (EHRENBERG, R., 2013)

### 2.2 Definitie

Het printen van elektrische circuits op een substraat, noemt men *printed electronics*. Er zijn heel veel mogelijkheden aangaande de keuze van het substraat. Plastiek, glas en papier zijn veel voorkomende keuzes, maar bijvoorbeeld textiel is ook een mogelijkheid. Klassieke printtechnieken zijn meer dan 500 jaar oud. *Printed electronics* is een verzamelnaam voor verschillende technieken die print- en elektriciteitstechnieken combineren. Deze technieken worden nog maar enkele jaren gebruikt voor het printen

van organische en anorganische halfgeleiders. De eerste transistor is geprint in 2003 en de eerste ring oscillator in 2005. De productie van circuits van *Organic complementary metal oxide semi-conductors* (CMOS's), met n-type en p-type conductors, werd in januari 2009 mogelijk gemaakt. (YLÖNEN, Y., NEUVO, S., 2010)

Nieuwe ontwikkelingen in *printed electronics* zorgen voor een breed draagvlak aan producttechnologieën voor het ontwikkelen van toepassingen. Verschillende producttechnologieën hebben zich opgeworpen tot verder onderzoek.

De lichtgevende technologieën van de *Light Emitting Capacitors* (LEC) en de *Organic Light Emitting Diodes* (OLED) worden uitgebreid besproken in hoofdstuk drie. Elektroluminescentie is het basisprincipe van beiden, maar het verschil ligt in de gebruikte materialen. Het lichtgevend materiaal in een LEC-*device* is een fosfor en in een OLED is dit een organisch materiaal (bijvoorbeeld een polymeer). Het toepassingsgebied van deze technologieën ligt bijgevolg in de residentiële en industriële lichtbronnen, reclametoepassingen en displays. (IDTECHEX, 2007) Door middel van elektrische aandrijving wordt er licht gegenereerd. Dit is luminescentie.

Organische fotovoltaïsche zonnecellen (OPV) zijn het printbare alternatief voor de zonnepanelen gebaseerd op silicium. Dit wordt ook verder besproken onder hoofdstuk drie. De inkomende fotonen zorgen voor het genereren van elektrische stroom in de zonnecel.

Een andere technologie, geschikt om te printen, is de *organic field-effect transistor*. De eerste organische field effect transistor werd gemaakt in 1982 door Ebisawa, Kurowa en Nara. Verder onderzoek liep gelijk met de groeiende interesse in organische halfgeleider. Het was een *metal-oxide-semiconductor field effect transistor* (MOSFET) die gebruik maakte van een organische halfgeleider. (KYMISSIS, I., 2009) De OFET-module is gebaseerd op een source en een drain (twee conductoren) met een halfgeleider en een diëlectrische laag op een substraat. Het substraat is de *gate electrode*. Door spanning te zetten op de gate electrode kan de stroom, die tussen de source en de drain vloeit, gestuurd worden. (GUO, Y., YU, G., LIU, Y., 2010) (DI, C., ZHANG, F., ZHU, D., 2012) De OFET-modules kunnen dan bijvoorbeeld dienen voor de aandrijving van displays in *active matrix* OLED's. Iedere pixel kan op die manier apart aangesproken worden. *Radio Frequency IDentification tags* (RFID-tags) zijn ook een mogelijke applicatie die voortvloeien uit de OFET-technologie. Dit is een transponder die via radiogolven signalen kan detecteren en beantwoorden aan de hand van informatie opgeslagen op de geprinte chip. (LEENEN, M.A.M., ARNING, V., THIEM, H., STEIGER, J., ANSELMANN, R., 2009)

De motivatie voor de recente ontwikkelingen binnen het gebied van *printed electronics* zijn de lage kosten en de hoge productiesnelheid van het proces. Door de prijs van de producten te drukken en de producten aantrekkelijk te maken, kunnen een groot aantal marktopportunities ontstaan. De producten zijn interessant omwille van de mogelijkheid tot een dun design dat flexibel is. *Printed electronics* is een samensmelting van drie innovatieve technologische gebieden, namelijk micro-elektronica, chemie en printing. De grote van de markt voor *printed electronics* wordt geschat op meer dan tweehonderd miljard euro. In de *case study* wordt er gekeken naar producten ontwikkeld voor de verpakings- en reclame-industrie. (PERELAER, J., SMITH, P., et al., 2010)

Bijgevolg genieten de geprinte toepassingen een aantal voordelen. Het proces laat toe om flexibele en dunnere producten te maken, met een lagere kost per product of component. Een uitdaging bij de ontwikkeling van toepassingen met *printed electronics* ligt in de inkt. De eigenschappen van de inkt moeten goed afgestemd zijn op de printtechniek. De investeringskosten van een *printed electronics* productielijn liggen ook veel lager dan de investeringskosten voor productielijnen van traditionele elektronica. (YLÖNEN, Y., NEUVO, S., 2010) (AZZOPARDI., B., EMMOTT, C.J.M., URBINA, A., KREBS, F.C., et al., 2011) Een *printed electronics* en een silicium productielijn kosten respectievelijk rond de dertig miljoen en drie miljard. *Printed electronics* kan momenteel nog geen volledige substituut zijn voor de traditionele, op silicium gebaseerde, elektronica. Enkel bij marktsegmenten met hoge volumes is *printed electronics* een zeer goed alternatief op basis van de lagere kosten en (naar de toekomst toe) flexibiliteit. (YLÖNEN, Y., NEUVO, S., 2010) Een voorbeeld van zo een marktsegment zijn de geprinte geleiders. In de automobielsector wordt vaak gebruik gemaakt van de geprinte geleider omdat ze plaats- en kostenbesparend zijn en betrouwbaarder op de lange termijn. (SAVASTANO, D.)



### 3. Printprocessen

Voor het toepassen van *printed electronics* kan men kiezen uit een groot gamma van verschillende printtechnieken. Elke techniek heeft zijn eigen specifieke eigenschappen, zodat de printtechniek kan gekozen worden die de beste prestaties levert voor het productieproces dat men voor ogen heeft. De eerste printtechnieken berusten op het blokdrukken, waarbij er inkervingen gemaakt werden op een blok, die dan resulteerden in witte vlakken op het substraat. Gelukkig zijn er ondertussen vele andere technieken ontwikkeld, die we terug kunnen brengen onder enkele printfamilies. (YLÖNEN, Y., NEUVO, S., 2010)

De processen, die zich het best lenen tot massaproductie, zijn *rotogravure printing*, *screen printing*, *offset lithographic printing* en *flexographic printing*. Voor deze technieken is er een lage productiekost door een hoge doorvoer, een fundamenteel voordeel voor massaproductie. (CANTATORE, 2012)

#### 3.1 *Intaglio printing*

De eerste familie van printtechnieken omvat de technieken die gebruik maken van een plaat of matrix waarin een patroon wordt gekerfd om dan op het substraat te drukken. (YLÖNEN, Y., NEUVO, S., 2010)

##### 3.1.1 Matrijsdrukken of *casting*

Het voordeel van deze techniek is dat bij casting geen materiaal nodig is buiten een mal en een vlak werkoppervlak. Het is de bedoeling om een oplossing, bestaande uit een solvent en de inkt met de juiste eigenschappen, op een substraat te brengen door middel van het vullen van de mal en dan op het substraat drukken en te laten drogen. Het is mogelijk om films te maken met een goede kwaliteit. De techniek lijdt echter onder een gebrek aan controle over de dikte en het drogen. (KREBS, F.C., 2009A)

*Gravure printing*, waarbij gebruik gemaakt wordt van gegraveerde rollen om het beeld op het substraat aan te brengen, wordt besproken onder de roterende printtechnieken en



vooral bij de *roll-to-roll* technieken. *Gravure printing* is echter ook een vorm van matrijsdrukken.

### 3.2 *Lithographic printing*

Dit zijn technieken waarbij er zones gemaakt worden die inkt afstoten en aantrekken op een vlakke plaat. Vandaar ook de naam *planographic printing*, omdat het patroon ontstaat vanaf een vlakke plaat zonder graving. (ZX-PRINTING COMPANY) Het patroon, wat ontstaat op de plaat, wordt dan rechtstreeks of via offset op het substraat gedrukt. De inkt bestaat uit een mix van een op olie gebaseerde inkt en water opdat deze zou houden op de hydrofiele vlakken. (KREBS, F.C., 2009A)

Voor een visuele voorstelling van *lithographic printing* kan worden doorverwezen naar hoofdstuk 3.3.2.1. Het verschil met *offset lithography* is dat een extra rol wordt geplaatst tussen het substraat en de *plate cylinder*. Een ander verschil kan zijn dat er bij *lithographic printing* geen gebruik gemaakt wordt van rollen maar vlakke platen om de afbeelding te transfereren op het substraat. (ZX-PRINTING COMPANY)

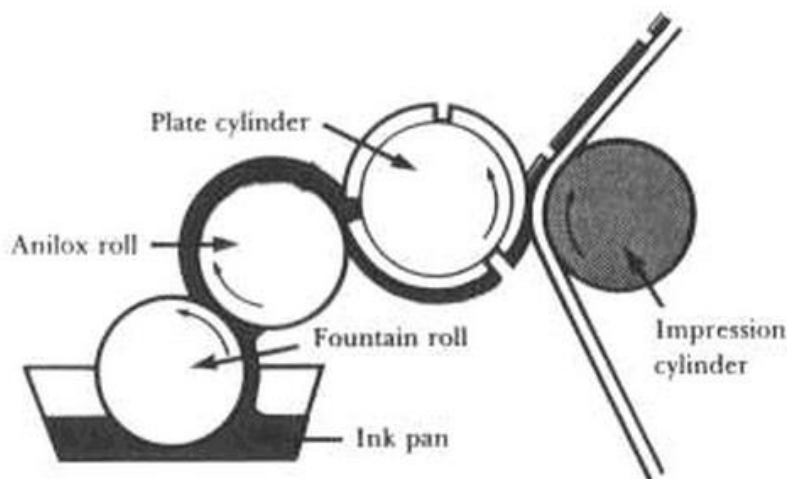
### 3.3 *Rotary printing*

Dit zijn printtechnieken waarbij er rollen gebruikt worden om inkt aan te brengen in plaats van een vlakke plaat. Er zijn drie vormen van *rotary printing*. Namelijk *flexographic printing*, *offset printing* en *rotogravure printing*. (YLÖNEN, Y., NEUVO, S., 2010)

### 3.3.1 Flexographic printing

De methode is in vele opzichten vergelijkbaar met *pad printing* en kan gezien worden als een continue vorm van *pad printing*. Het is een systeem van vier rollen. Een *anilox roller*, die de gewenste hoeveelheid inkt via de *fountain roller* op de *printing cylinder* of de *anilox roll* aanbrengt. De *plate cylinder*, met daarop de inkt in het patroon met gewenste dikte, bevestigt de inkt dan op het substraat dat ondersteund wordt door de *impression roller*. Het resulterende patroon wordt dus gevormd door gravering van de *plate cylinder*. (PNEAC) De gravures op deze cilinder vormen dus het negatieve beeld en worden de niet gevulde gebieden op het substraat. In Figuur 1 staat een afbeelding van het printproces. Het is een eerder eenvoudig proces dat zich vooral leent tot polymere *photovoltaics*. (KREBS, F.C., 2009A)

Een constructie bestaande uit drie rollen behoort ook tot de mogelijkheden. Dan wordt de *fountain roller* ertussenuit gelaten. Wanneer de *anilox roller* de inkt opneemt in het gegraveerd patroon van de roller, wordt de overtollige inkt eraf geschraapt door middel van scherpe messen ofwel *doctor blades*. De *anilox roller* bepaalt dus hoeveel inkt er opgenomen kan worden door de frequentie en diepte van de graveringen. Door middel van de patronen kunnen er dus afgemeten lijnen en rasters aangebracht worden op het substraat. (DEGANELLO, D., CHERRY, J.A., GETHIN, D.T., CLAYPOLE, T.C., 2010)



**Figuur 1: Overzicht van flexographic printing.**

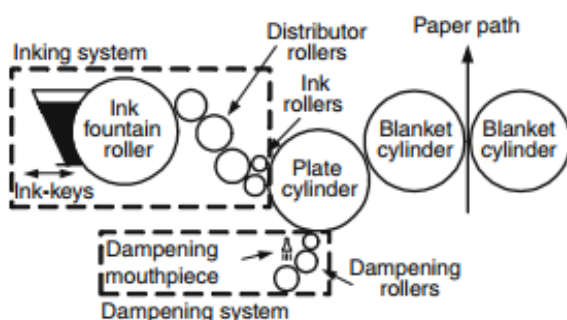
Bron: (PNEAC)

### 3.3.2 Offset

Offset Printing is een techniek die gebruik gemaakt van een tussenrol. Er is dus geen rechtstreeks contact tussen de eerste rol waarop de inkt aangebracht wordt en het substraat. Hiertussen zullen één of meerdere rollen toegevoegd worden.

#### 3.3.2.1 Offset lithography

Dit is een twee-dimensionele printtechniek, die mogelijkheden biedt voor de toekomst van polymere zonnecellen. In tegenstelling tot andere twee-dimensionele printtechnieken, liggen bij deze techniek zowel het bedrukte als het niet bedrukte gebied in hetzelfde vlak (planografisch). Er worden hydrofobe en hydrofiële gebieden gecreëerd waarop de inkt respectievelijk niet en wel blijft hangen. Eerst wordt een dunne laag water via *dampening rollers* aangebracht op de *plate cylinder*. Dan worden via *distribution en ink rollers* de inkt aangebracht op de *plate cylinder*. Op deze manier wordt het patroon op de *plate roller* duidelijk. Dat patroon wordt vervolgens overgezet op de *offset roll* of ook wel *blanket cylinder* genoemd. (ENGLUND, C., VERIKAS, A., 2009) Het verschil met *lithographic printing* is dus dat het lithografisch patroon niet rechtstreeks wordt aangebracht op het substraat maar eerst op een intermediaire rol overgedragen wordt. Deze rol is van rubber zodat de inkt goed op het substraat kan gedrukt worden. (KREBS, F.C., 2009A) In figuur 2 staat een overzicht van de het proces.

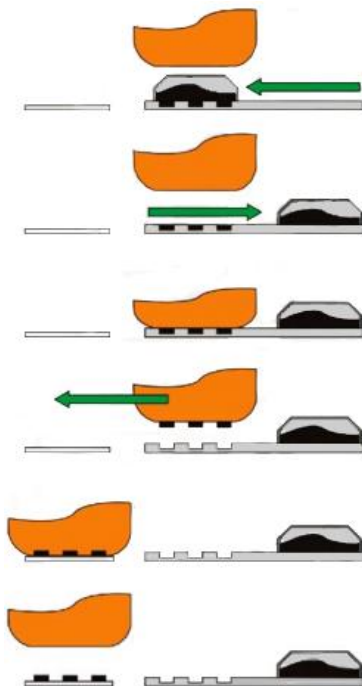


**Figuur 2: Overzicht van lithographic printing.**

Bron (ENGLUND, C., VERIKAS, A., 2009)

### 3.3.2.2 *Pad printing*

Met deze printtechniek kan er 2-dimensionaal geprint worden op kleine oppervlakten. Het is een offset techniek waarbij een siliconen, rubberen stempel gebruikt wordt om het printpatroon van de gravure op het substraat aan te brengen. In figuur 3 wordt het proces grafisch voorgesteld. Het inktreservoir beweegt over de gegraveerde plaat, zodat de gravures gevuld worden met inkt. Het reservoir beweegt terug naar zijn initiële positie. De rubberen *stamp* wordt dan op de inkt gedrukt om de inkt op te nemen en op het substraat te plaatsen. (MOORING, L., KAROUSOS, N.G., LIVINGSTONE, C., DAVIS, J., et al., 2005) Er kunnen relatief volatiele inkten gebruikt worden en het natte motief wordt enkel zeer kort blootgesteld aan de atmosfeer tussen het opnemen van de inkt van de gravure en het aanbrengen van de inkt op het substraat. De inkt is nog moeilijk te verkrijgen en er is een grote hoeveelheid van nodig. Een voordeel is dat er weinig inkt verloren gaat. (KREBS, F.C., 2009A)



**Figuur 3: Overzicht van het *pad printing* proces.**

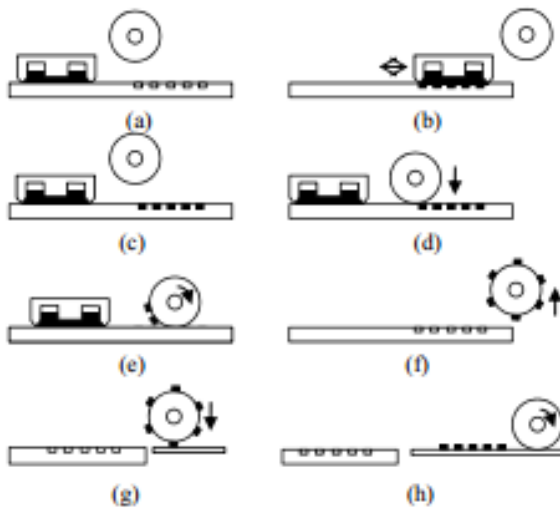
Bron (MOORING, L., KAROUSOS, N.G., LIVINGSTONE, C., DAVIS, J., et al., 2005)

Voor het aanbrengen van de actieve laag van organische zonnecellen is deze techniek geschikt bevonden in 2008. De sterkte van deze techniek ligt hem in de mogelijkheid om te printen op ruwe en golvende oppervlakten. Het is echter niet geschikt voor het drukken op grote substraten. In vergelijking met andere courante technieken, zoals

bijvoorbeeld *doctor blading*, is het een vrij complexe methode, wat het inferieur maakt aan dergelijke technieken. (KREBS, Pad printing for film forming technique for polymer solar cells, 2008)

### 3.3.3 (Roto)gravure printing

Dit is een intaglio-techniek toegepast op roterende ronde printplaten. De voordelen hiervan zijn dat de techniek een hoge snelheid en kwaliteit kan bereiken. (YLÖNEN, Y., NEUVO, S., 2010)



**Figuur 4: Plate to plate gravure printing.**

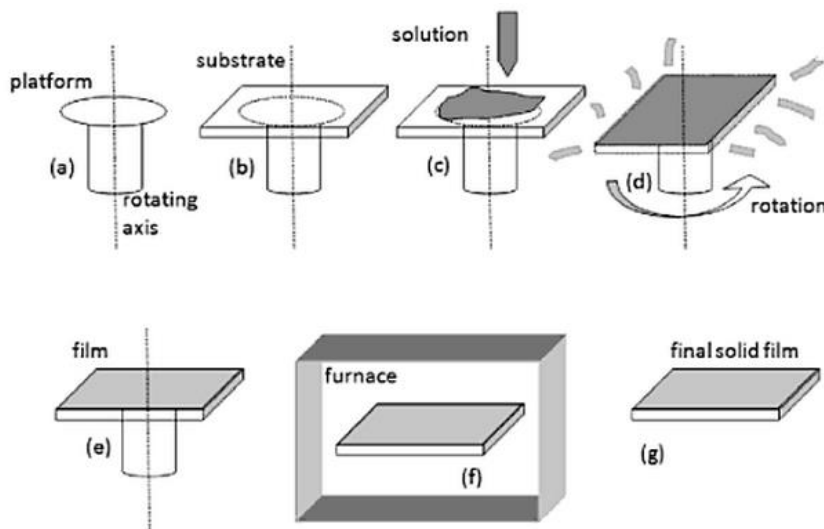
Bron: (LEE, T., NOH, J., KIM, I., KIM, D., CHUN, S. , 2010)

In figuur 4 wordt een plaat naar plaat gravureproces afgebeeld. De inkt wordt vanuit een reservoir aangebracht op een gegraveerde plaat. De gravures worden gevuld en afgestreaken zodat de juiste hoeveelheid inkt in de gravures zit. De rol beweegt dan over de gegraveerde plaat en neemt de inkt op. Het patroon bevindt zich nu op de rol en kan aangebracht worden op het substraat. (LEE, T., NOH, J., KIM, I., KIM, D., CHUN, S. , 2010)

De techniek wordt verder bestudeerd bij de *roll-to-roll* technieken. In dat geval wordt er een gegraveerde rol gebruikt in plaats van een gegraveerde plaat.

### 3.4 Spin coating

Dit is nog steeds een van de belangrijkste technieken voor de ontwikkeling van polymere zonnecellen. Deze techniek produceert zeer homogene films over een klein oppervlak. Een vloeistof wordt over een klein oppervlak aangebracht. De vloeistof bestaat uit polymere of organische materialen opgelost in een solvent. Belangrijk is dat het solvent bij matige temperaturen uit de oplossing kan verdampen. Matige temperaturen is belangrijk om de functionaliteit van de overgebleven laag niet aan te tasten. (PEREIRA, L., 2012) Het aanbrengen van de oplossing kan zowel gebeuren voordat het substraat begint te roteren als tijdens de rotatie. Een deel van de oplossing wordt van het oppervlak verwijderd tijdens de rotatie door middel van centrifugale kracht, waardoor een dunne film achterblijft op het substraat. Tijdens de rotatie kan al een deel van het solvent verdampt zijn uit de oplossing, maar vaak wordt achteraf de dunne film nog uitgedroogd in een oven (zie figuur 5). (WIDMANN, D., MADER, H., FRIEDRICH, H., 2000) Deze techniek is vaak toegepast geweest bij de ontwikkeling van *digital versatile discs* (DVD's) en *compact discs* (CD's). (KREBS, F.C., 2009A)



**Figuur 5: Overzicht van het *spin coating* proces.**

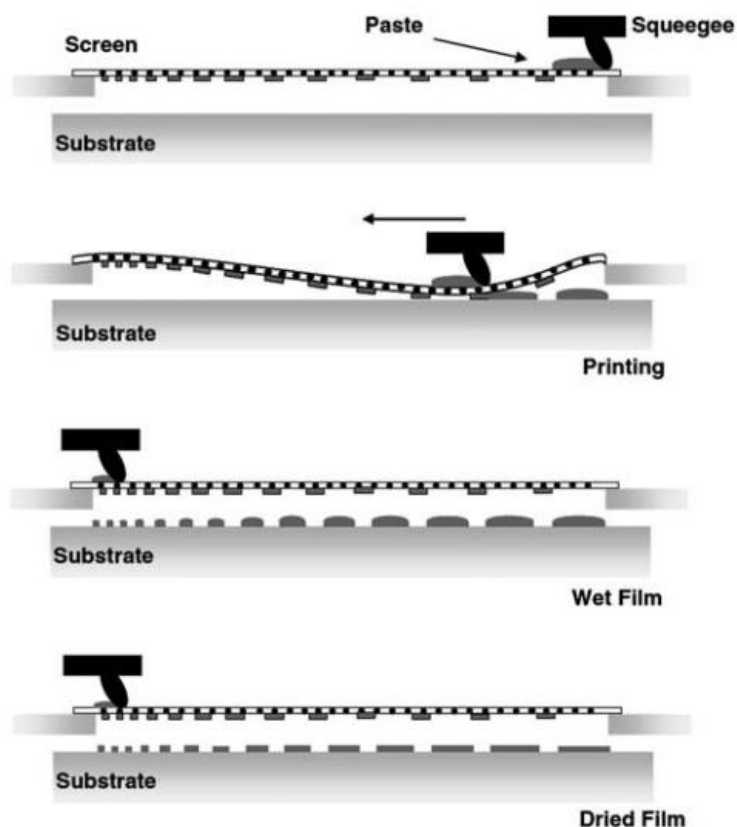
Bron (PEREIRA, L., 2012)

*Spin coating* is niet compatibel met *roll-to-roll processing*, wat een groot nadeel is voor de productie op grote schaal. Verder kan er ook geen *patterning* mee gedaan worden. Dit is een proces dat vereist is om kleurendisplays te maken en wordt verder uitgelegd in

hoofdstuk 6.1.2.1.2. *Spin coating* is een techniek die gebruikt wordt voor het maken van OLED's, maar biedt dus geen mogelijkheden voor massaproductie en het maken van kleurenschermen. (SHINAR, 2004)

### 3.5 *Screen printing*

*Screen printing* is een techniek die al bestaat sinds het begin van de 20<sup>ste</sup> eeuw. Deze techniek kan gebruikt worden voor 2 dimensionaal printen en kan toegepast worden op niet vlakke substraten. Het is een zuinige methode aangezien er weinig verlies aan inkt is. De inkt moet wel een hoge viscositeit en een lage volatiliteit hebben. De techniek maakt gebruik van een geweven scherm dat onder rekspanning staat met daarin een negatieve afbeelding van het gewenste patroon, zodat de inkt door het benodigde patroon gaat, maar niet door de rest van het scherm. De juiste *mesh count* is essentieel om de gewenste hoeveelheid inkt door het scherm te duwen, zodat niet teveel inkt op het substraat komt. De *mesh count* is het aantal draden per oppervlaktemaat. (GONZALEZ-MACIA, L., MORRIN, A., SMYTH, M.R., KILLARD, A.J., 2010) Het patroon kan gemaakt worden door het scherm te vullen met inkt en het scherm in contact te brengen met het substraat. De *squeegee* beweegt dan over het scherm en duwt de inkt door het patroon op het substraat. (YLÖNEN, Y., NEUVONEN, S., 2010) Het proces wordt grafisch afgebeeld in figuur 6.



**Figuur 6: Een overzicht van het *screen printing* proces**

Bron: (GONZALEZ-MACIA, L., MORRIN, A., SMYTH, M.R., KILLARD, A.J., 2010)

Het is aangetoond dat *screen printing* momenteel de meest beloftevolle techniek is voor elektroluminescentie. Ook andere technologieën, zoals bijvoorbeeld biosensoren, maken ook al enige tijd gebruik van *screen printing*. Het is namelijk een lage kosten methode, die eenvoudig te gebruiken is in vergelijking met technieken als bijvoorbeeld vacuümdepositie. Deze methoden worden niet verder besproken in deze thesis omdat de schaalbaarheid beperkt blijft en dus minder geschikt is voor *printed electronics*. De mogelijkheid tot massaproductie maakt de *screen printing* methode ook economisch nog interessanter. (SHON, P.K., SHIN, J.H., KIM, G.C., LEE, S.N., 2012) Verder onderzoek werd gedaan naar hoe de snelheid en de *mesh count* een invloed hadden op de kwaliteit van de gedrukte lagen en bijgevolg van het product. De *mesh count* is het aantal draden per inch in het scherm. Resultaten werden ook apart bekeken voor de "wet over wet" en "wet over dry" printing. Dit geeft aan of er tussen twee printstappen een laag gedroogd wordt. Met deze variabelen moet dus rekening gehouden worden bij het drukken van elektroluminescentie met *screen printing*. Ook in dit onderzoek wordt aangegeven dat de



beste manier voor productie van LEC-toepassingen *screen printing* is. (SHEDD, M., OSTROUT, N., 2011)

De keuze voor *screen printing* als techniek ligt ook in het feit dat het de meest veelzijdige printtechniek is die makkelijk toe te passen is. Het is wel belangrijk dat de inkt niet uitdroogt op het scherm zodat de kwaliteit van de gedrukte film er op achteruit gaat. Voor de morfologie en dikte van de actieve laag in OPV is het belangrijk dat er grote controle is bij het printen van deze laag. Bij *screen printing* is er een grote natte gedrukte oppervlakte waarbij controle moeilijker is. (KREBS, F.C., JORGENSEN, M., NORRMAN, K., HAGEMANN, O. et al., 2009)

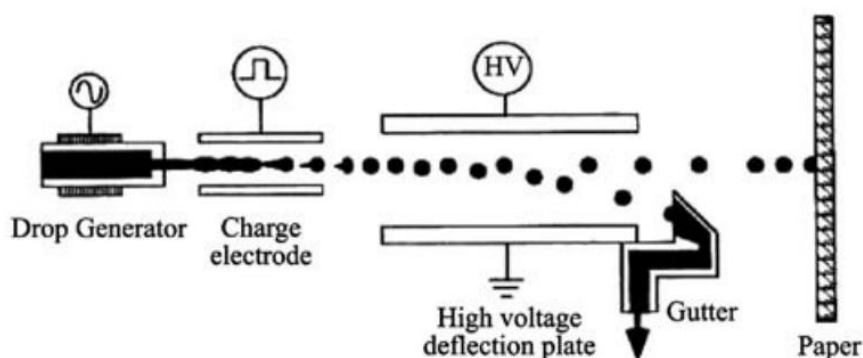
### 3.6 *Ink jet printing*

Dit is een techniek die gebruikt wordt voor thuisgebruik en minder voor industrieel gebruik. De uitvinding vond in 1976 plaats, maar werd pas commercieel verkrijgbaar vanaf 1988. (COSTELLO, A., DOHERTY, D., LEBEAU, J., WARREN, R., 2010) Het voordeel is dat de techniek een hoge resolutie biedt en het beeld dat gedrukt moet worden is digitaal. De snelheid is eerder een minpunt. *Ink jet* is traag met op dit moment weinig mogelijkheden met het opvoeren van de snelheid. Enkel *pad printing* heeft nog een tragere maximumsnelheid. In tabel 1 worden de relatieve snelheden per printtechniek ten opzichte van elkaar bekeken. *Ink jet printing* is eerder een complexe techniek. Het idee erachter is het creëren van kleine druppels, die dan op het substraat aangebracht worden. Dan worden ze elektrostatisch geladen en worden ze naar het substraat getrokken door een elektrisch veld. Het verlies aan inkt is bij deze methode relatief laag. (KREBS, F.C., 2009A)

Ontwikkelaars van koppen voor digitaal *ink jet* printen hebben verder gewerkt om steeds kleinere printkoppen te maken. Hierdoor kan de resolutie verhoogd worden en samen met het ontwikkelen van *ink jet* systemen met meerdere koppen, die de doorvoer verhogen, wordt de concurrentiepositie versterkt ten opzichte van de andere technieken. (CANTATORE, 2012)

Twee manieren zijn ontwikkeld om de druppels op de juiste plaats te laten vallen. De eerste wijze is een druppelsysteem waarbij een druppel valt wanneer een druppel gevraagd wordt door de digitale aansturing. Dit is de *drop on demand* techniek waarbij de druppels op twee manieren kunnen gevormd worden. Bij de thermische manier wordt

door hitte in de printkop een luchtbel gevormd, die bij het springen een druppel laat vallen. De andere manier is een piëzo-elektrische printkop. De druppels worden gevormd door de voorwaartse trilling of vervorming van een piëzo-kristal die de inkt door de printkop duwt. De trilling wordt gegenereerd door een kleine hoeveelheid stroom, die door het kristal gestuurd wordt. (MOLESA, S.E., 2006) (COSTELLO, A., DOHERTY, D., LEBEAU, J., WARREN, R., 2010) (DE GANS, B-J., DUINEVELD, P.C., SCHUBERT, U.S., 2004) In het andere geval is er geen aanvraag voor druppel nodig maar gebeurt het druppelen continu. Om met deze techniek een patroon te verkrijgen, worden de druppels die niet op het substraat moeten vallen, geladen en afgebogen in een inktreservoir. Dit wordt grafisch voorgesteld in figuur 7. De opgevangen inkt in het reservoir wordt dan opnieuw naar de inkt jet kop gevoerd om de inktverliezen te minimaliseren. (SONDERGAARD, R., HÖSEL, M., ANGMO, D., LARSEN-OLSEN, T.T., KREBS, F.C., 2012)



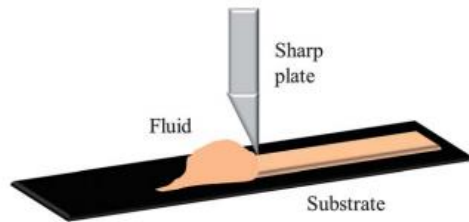
**Figuur 7: Een overzicht van electrostatisch *Ink jet printing*.**

Bron: (GONZALEZ-MACIA, L., MORRIN, A., SMYTH, M.R., KILLARD, A.J., 2010)

### 3.7 Doctor blading

Dit is een techniek die zeker nog verder onderzocht moet worden, zeker als het aankomt op de inkt. De techniek laat toe om zeer nauwkeurig een dikte te bepalen voor de film. Het is een zuinige techniek waarbij het verlies van de *coating* oplossing kan beperkt worden tot minder dan 5%. Er wordt een scherp mes geplaatst op een vaste afstand van het substraattoepervlak. De *coating*oplossing wordt voor het mes geplaatst en dat mes wordt dan lineair over het oppervlak geschoven zodat er een gelijke, natte laag ontstaat op het substraat. De uiteindelijke laag is optimaal als de laag half zo dik is. (KREBS,

Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques, 2008) In figuur 8 wordt het proces eenvoudig afgebeeld. Dit proces kan ook makkelijk vertaald worden naar het *roll-to-roll* proces. De *doctor blade* of *knife* blijft stilstaan op een vaste hoogte van het voortbewegende web. (CANTATORE, 2012) Dit wordt verder besproken onder hoofdstuk 4.1.



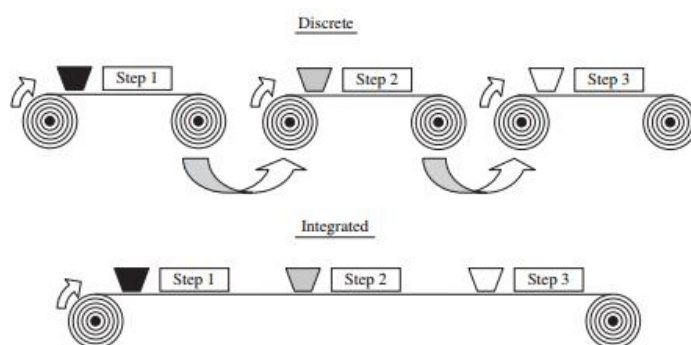
**Figuur 8: De *doctor blading* techniek.**

Bron: (TEICHLER, A., PERELAER, J., SCHUBERT, U.S., 2012)

## 4. Procesintegratie of *roll-to-roll* productie

Om verschillende productieprocessen efficiënt te integreren, kan er gebruik gemaakt worden van *roll-to-roll* technieken. Dit werd reeds gebruikt bij het drukken van kranten, maar vindt zijn weg meer en meer naar het printen van *printed electronics*. (GONZALEZ-MACIA, L., MORRIN, A., SMYTH, M.R., KILLARD, A.J., 2010) Een substraat wordt nu afgewikkeld van een rol, ondergaat dan één of meerdere processtappen en rolt dan terug op een volgende rol. Dit proces herhaalt zich tot alle stappen, die geautomatiseerd zijn, van het productieproces doorlopen zijn. (KREBS, F.C., 2009A) (MORSE, J.D., 2011)

Door deze technieken toe te passen kan de snelheid van de productie bevorderd worden. Tussen het afrollen en het oprollen van het substraat op een rol, doorloopt het substraat één of meerdere print- en/of andere processtappen. Elke processtap heeft een specifieke plaats en tijd in het proces zodat het gewenste resultaat kan bereikt worden. (MORSE, J.D., 2011) Alles moet in dit continue proces goed op elkaar afgestemd zijn. In een discreet proces worden tussen twee rollen telkens maar één stap uitgevoerd. De rol kan ook terugdraaien om de vorige stap te herhalen. Bij een geïntegreerd proces worden er meerdere processen uitgevoerd tussen twee rollen. Beide processen zijn afgebeeld in figuur 9. Verder zijn er een aantal factoren die belangrijk zijn bij het gebruik van *roll-to-roll* processing. De spanning, snelheid, web-controle, reinigen van het web, het verwijderen van de statische elektriciteit, het drogen, het verhitten, de UV-behandeling en de koeling van het web moeten goed in het oog gehouden worden. (KREBS, F.C., 2009A)



**Figuur 9: Roll-to-roll productie, discreet en geïntegreerd.**

Bron: (KREBS, F.C., 2009A)

Andere processtappen kunnen het verwarmings-, drogings- en UV-proces omvatten. Er zijn een heel aantal *coating*-technieken voor *roll-to-roll* processing om de inkt op het web

aan te brengen. Een kort overzicht van deze technieken worden hieronder meegegeven. (KREBS, F.C., 2009A)

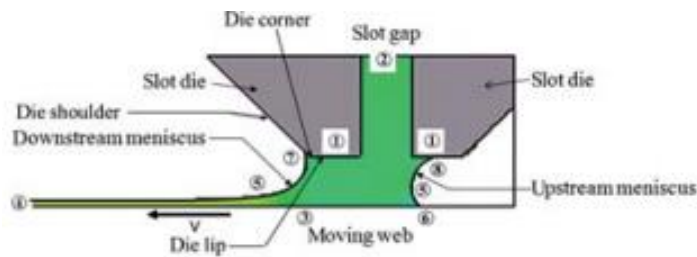
#### 4.1 *Knife over edge en meniscus coating*

*Doctor blading* is de geïsoleerde vorm van *knife over edge coating*. Het enige verschil is echter dat bij de *roll-to-roll* technieken het web beweegt en het mes vast staat. De resultaten van *doctor blading* op labschaal kunnen in grote lijnen doorgetrokken worden naar *knife coating* in een *roll-to-roll* proces. (SONDERGAARD, R., HÖSEL, M., ANGMO, D., LARSEN-OLSEN, T.T., KREBS, F.C., 2012) De inkttoevoer gebeurt voor het mes en wordt dan gelijk verdeeld over het oppervlak. De dikte van de laag wordt bepaald door de afstand tussen het mes en het substraat. Een nadeel is dat de techniek nul-dimensionaal is. Patronen kunnen niet aangebracht worden. Bij *meniscus coating* wordt de egaliteit van de laag niet bereikt door een mes maar door een roller. Beide technieken lenen zich tot het egaal maken van een ruw oppervlak. (KREBS, F.C., 2009A)

#### 4.2 *Slot die coating*

Deze techniek laat toe om één-dimensionale lagen te maken. Het patroon kan dus bestaan uit strepen. De inkt wordt onder druk aangevoerd en door openingen gedrukt naar de printkoppen. Het patroon wordt gevormd door het afsluiten en openzetten van verschillende koppen door middel van een *mask*. Het patroon kan 1-dimensionaal zijn. Deze printtechnologie is, door de mogelijkheid tot het snel printen van vele afzonderlijke strepen inkt naast elkaar, zeer interessant voor de productie van *organic photovoltaïcs*. (SONDERGAARD, R., HÖSEL, M., ANGMO, D., LARSEN-OLSEN, T.T., KREBS, F.C., 2012) Op deze manier kunnen dan verschillende lagen van dat patroon op elkaar worden geprint. Het patroon kan gemakkelijk aangepast worden door het vervangen van de *mask*. Een *mask* met een ander patroon zorgt ervoor dat het nieuw patroon op het substraat aangebracht wordt. (KREBS, F.C., 2009A)

In figuur 10 is een voorbeeld van een *slot die* kop afgebeeld. Een meniscus zorgt ervoor dat de laag op de juiste dikte wordt afgestreeken. Langs boven gebeurt de inkttoevoer en de inkt wordt door het open slot naar het web gevoerd.



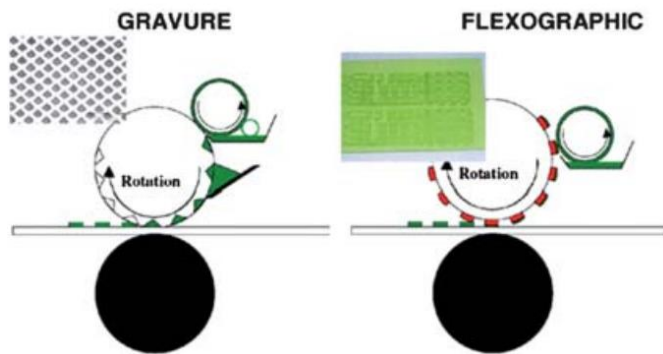
**Figuur 10: Slot die coating.**

Bron: (LIN, C., WANG, B., TIU, C., LIU, T., 2012)

### 4.3 Gravure coating en flexographic printing

Beide technieken zijn reeds aan bod gekomen onder hoofdstuk 3. *Gravure coating* is een techniek die zeer hoge snelheden kan behalen. Een belangrijke eigenschap van de inkten is dat deze een lage viscositeit of stroperigheid moeten hebben. (SONDERGAARD, R., HÖSEL, M., ANGMO, D., LARSEN-OLSEN, T.T., KREBS, F.C., 2012) Het is ook een 2 dimensionale *coating* techniek, die gebruik maakt van een rol met daarin gegraveerde lijnen of vormen. De dikte van de inkt op het substraat wordt bepaald door diepte van de gravures op de rol. (SONDERGAARD, R., HÖSEL, M., ANGMO, D., LARSEN-OLSEN, T.T., KREBS, F.C., 2012) Deze *coating* (of gravure) roller gaat door een inktbad en vóór de rol op het web wordt gedrukt, wordt het teveel aan inkt van de rol gehaald door een mes. Het nadeel ten opzichte van *slot diecoating* is dat het veranderen van patroon het graveren van een nieuwe rol vereist. Dit is kostelijker dan het vervangen van een *mask*. (KREBS, F.C., 2009A)

Figuur 11 zet beide printtechnieken nog eens langs elkaar. In vergelijking met *gravure coating* moet tijdens *flexographic printing* minder druk gezet worden op het substraat om de inkt aan te brengen. Omdat de kost van de rollen bij het gravure proces duurder zijn wordt *gravure printing* vooral gebruikt op grote schaal. *Flexographic printing* kan ook bij kleinere projecten gebruikt worden. (GONZALEZ-MACIA, L., MORRIN, A., SMYTH, M.R., KILLARD, A.J., 2010)



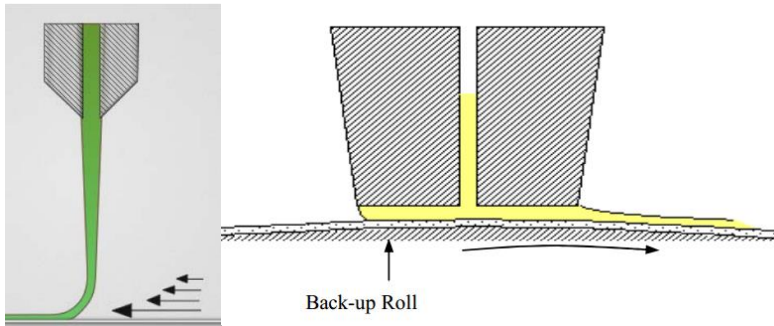
**Figuur 11: Overzicht van gravure printing en flexographic printing bij roll-to-roll productie.**

Bron: (GONZALEZ-MACIA, L., MORRIN, A., SMYTH, M.R., KILLARD, A.J., 2010)

#### 4.4 *Curtain, multiple slot en slide coating*

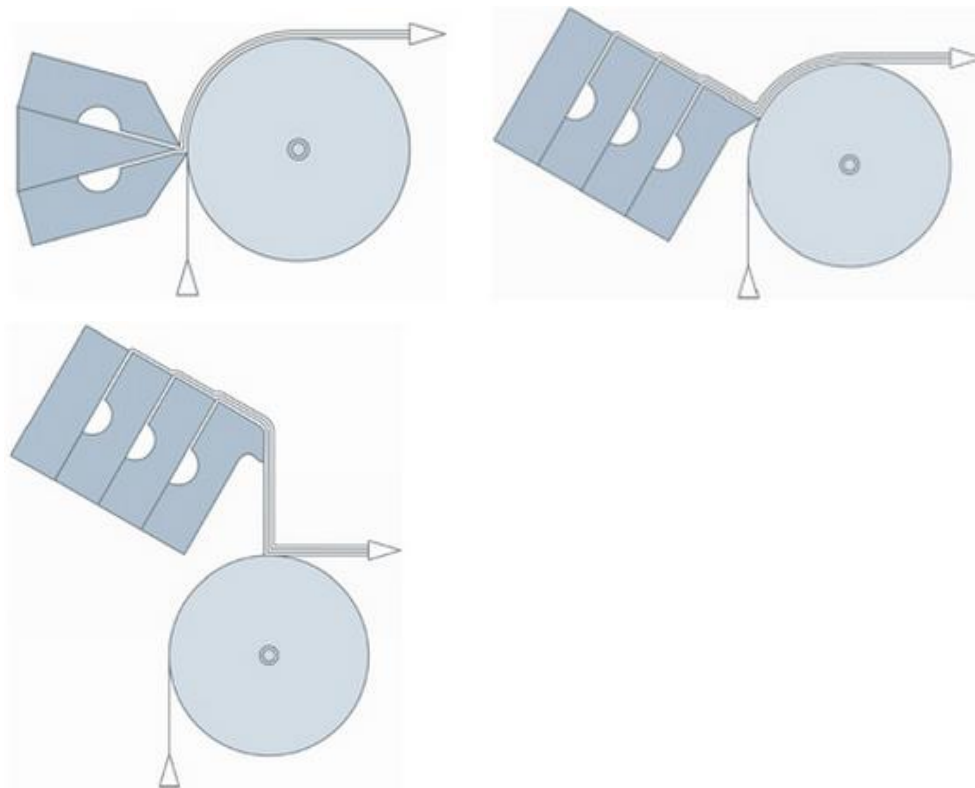
De productiesnelheid zou enorm opgevoerd kunnen worden als er verschillende *coatings* tegelijkertijd zouden aangebracht kunnen worden. De besparingen bij de productie zouden significant kunnen verhoogd worden. De vereisten voor het proces zijn een hoge snelheid van het web zodat een snelle inkttoevoer kan gebruikt worden. De moeilijkheid is dan echter het proces en het resultaat van de verschillende *coating*-lagen onder controle te houden. (KREBS, F.C., 2009A)

Bij *curtain coating* valt de inkt vanop een hoogte tussen de 10 en 40 centimeter op het web. (TRIPATHI, P., JOYCE, M., LEE, D.I., FLEMING, P.D., et al., 2006) Bij *slot coating* wordt hetzelfde principe gebruikt als bij *slot die-coating* (Hoofdstuk 4.2). De twee *single layer* technieken worden in figuur 12 afgebeeld. De toevoer van de inkt gebeurt dus rechtstreeks van de printkop op het substraat, waarbij het web onder een bepaalde spanning moet staan. (PARK, E., 2008) Bij *slide coating* maakt de printkop geen contact met het web, maar vloeien de inkten over een vlak naar een opwaarts bewegend web toe. De inkten mixen niet, maar blijven apart vanaf het begin tot en met het drogen. (GUTOFF, E.B., COHEN, E.D., 2006) De verschillen worden duidelijk in afbeelding 13.



**Figuur 12: Afbeelding van *Curtain coating* (links) en *slot coating* (rechts).**

Bronnen: (TRIPATHI, P., JOYCE, M., LEE, D.I., FLEMING, P.D., et al., 2006) (PARK, E., 2008)



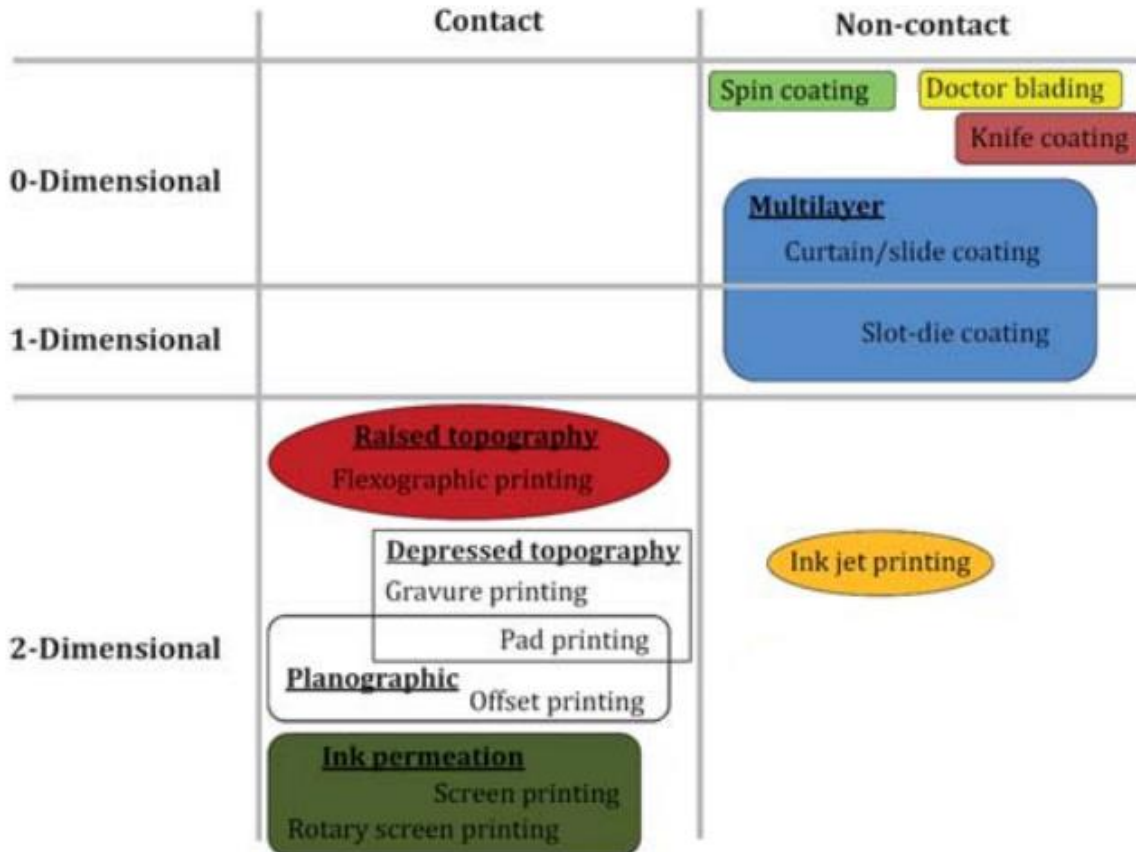
**Figuur 13: Afbeelding van *multiple slot coating* (linksboven), *slide coating* (rechtsboven) en *curtain coating* (onder).**

Bron: (TSE Troller AG)



## 4.5 Overzicht eigenschappen printtechnieken

In figuur 14 worden de printtechnieken ingedeeld volgens hun mogelijkheden om in een bepaald aantal dimensies te kunnen printen. Op de horizontale as worden de technieken ingedeeld aan de hand van de eigenschap of het printmechanisme in contact komt met het substraat of niet.



**Figuur 14: Overzicht dimensionaliteit en contact van de printtechnieken.**

Bron (KREBS, F.C., FYENBO, J., JORGENSEN, M., 2010)

De conclusie kan getrokken worden dat voor de printtechnieken die contact maken met het web, tweedimensionaal kan geprint worden. Voor de printtechnieken die geen contact maken met het substraat is dit moeilijker. Van de onderzochte technieken slaagt enkel *ink jet printing* in de opzet om in 2-D te printen.

Om te resumeren wat de sterktes en zwaktes van de verschillende printtechnieken zijn, worden deze in tabel 1 weergegeven.

Technique	Ink waste	Pattern	Speed	Ink preparation	Ink viscosity (cP)	Wet thickness ( $\mu\text{m}$ )	R2R compatible
Spincoating	5	0	–	1	1	0–100	No
Doctor blade	2	0	–	1	1	0–100	Yes
Casting	1	0	–	2	1	5–500	No
Knife-over-edge	1	0	2–4	2	3–5	20–700	Yes
Meniscus	1	0	3–4	1	1–3	5–500	Yes
Curtain	1	3	4–5	5	1–4	5–500	Yes
Slide	1	3	3–5	5	1–3	25–250	Yes
Slot-die	1	1	3–5	2	2–5	10–250	Yes
Screen	1	2	1–4	3	3–5	10–500	Yes
Ink jet	1	4	1–3	2	1	1–500	Yes
Gravure	1	2	3–5	4	1–3	5–80	Yes
Flexo	1	2	3–5	3	1–3	5–200	Yes
Pad	1	2	1–2	5	1	5–250	Yes

Ink waste: 1 (none), 2 (little), 3 (some), 4 (considerable), 5 (significant). Pattern: 0 (0-dimensional), 1 (1-dimensional), 2 (2-dimensional), 3 (pseudo/quasi 2/3-dimensional), 4 (digital master). Speed: 1 (very slow), 2 (slow  $< 1 \text{ m min}^{-1}$ ), 3 (medium  $1\text{--}10 \text{ m min}^{-1}$ ), 4 (fast  $10\text{--}100 \text{ m min}^{-1}$ ), 5 (very fast  $100\text{--}1000 \text{ m min}^{-1}$ ). Ink preparation: 1 (simple), 2 (moderate), 3 (demanding), 4 (difficult), 5 (critical). Ink viscosity: 1 (very low  $< 10 \text{ cP}$ ), 2 (low  $10\text{--}100 \text{ cP}$ ), 3 (medium  $100\text{--}1000 \text{ cP}$ ), 4 (high  $1000\text{--}10,000 \text{ cP}$ ), 5 (very high  $10,000\text{--}100,000 \text{ cP}$ ).

**Tabel 1: Overzicht proceseigenschappen en vereisten van de verschillende printtechnieken.**

Bron: (KREBS, F.C., 2009A)

Uit deze tabel kunnen enkele conclusies getrokken worden. Omdat *spincoating* niet als *roll-to-roll* proces gebruikt kan worden, zal dit vooral op labschaal toegepast blijven worden.

In tegenstelling tot in de vorige tabel worden curtain en slide wel gerekend tot de pseudo/quasi 2/3 dimensies. De verklaring hiervoor zal liggen in het feit dat meerdere lagen tegelijkertijd geprint worden en dus in de hoogte gewerkt wordt. Dit zijn ook een van de technieken die tot hoge snelheden kunnen opgedreven worden. Het nadeel bij de *multilayer* technieken is wel dat de inkten moeilijk te ontwikkelen zijn. Op dat vlak zal het onderzoek naar de inkt nog verdere ontwikkelingen teweeg moeten brengen.

Andere printtechnieken als *gravure printing* en *flexographic printing* bieden de mogelijkheid om 2-D te printen en hebben tegelijkertijd ook een hoge processnelheid.

De viscositeit van de inkten voor de verschillende technieken, geeft de stroperigheid aan van de inkt. Hoe hoger de waarde, hoe stroperiger de inkt moet zijn voor de printtechniek. De dikte van de geprinte inkt voor de verschillende printtechnieken staat aangegeven in micrometer ( $\mu\text{m}$ ).



## 5. Droger en laminator

De geprinte inkt moet gedroogd worden. Dit kan door middel van een heteluchtdroger, een infrarood droger, een UltraViolet-droger (UV-droger) of een combinatie. (NATGRAPH) Een heteluchtdroger wordt het vaakst gebruikt omdat de inkten makkelijker te maken zijn in vergelijking met de UV-droger. Niet alle inkten zijn namelijk *UV-curable*. Ten opzichte van de UV- en infrarooddroger is de aankoopkost van een heteluchtdroger ook lager. Bij een heteluchtoven wordt de lucht verwarmd tot de ingestelde temperatuur en wordt naar de inkt geblazen. Een nadeel van deze techniek is dat het langer duurt. De keuze van het substraat heeft dan weer een invloed op de maximale temperatuur die kan gebruikt worden. Als het substraat van plastic is, is het maximum tachtig graden. De lange duur van de droger kan een bottleneck zijn in het systeem. Hoe langer de droogcyclus is, hoe langer de droger zal moeten zijn om de printer bij te houden. Een ander probleem is dat in de heteluchtdroger het substraat kan uitzetten door de warmte. Dit verlaagt de controle over het proces. Bij laser drogers wordt de juiste golflengte bepaald om de substraten niet te beschadigen. (YOON, D., KIM, D., 2011) Door UV-belichting kort toe te passen kan er ook snel gedroogd worden. Het nadeel is dat niet alle inkten UV-droogbaar zijn. Het gebruik van de UV-droger hangt dus samen met de beschikbaarheid van inkten die hiervoor geschikt zijn. (NATGRAPH)

De laminator zorgt voor de inkapseling van de gedrukte module. Het is de beschermlaag die de module moet afschermen van materies van buiten af. OPV is bijvoorbeeld een technologie die heel gevoelig is voor vocht en lucht. Het is dus belangrijk dat er een folie gebruikt wordt, wat er voor zorgt dat die elementen zo min mogelijk doordringen tot de module. (NANOMARKETS, 2011) Er is de keuze tussen warme of koude laminatie of *UV-coating*. Het verschil tussen warme en koude laminatie zit in de manier waarop de folie kleeft op de module. De warmte doet een stof smelten in de plastic folie die voor adhesie gaat zorgen wanneer het in contact komt met de module. Bij koude laminatie wordt de klevende eigenschap van de folie geactiveerd door druk. Op deze manier komt de folie dus ook vast op de module te zitten. (LAMINATORS) *UV-coating* daarentegen maakt gebruik van UV-lampen die gebruikt worden om de *coating*vloeistof om te zetten in een vaste *coating*laag. Een belangrijk voordeel is dat *UV-coating* de kleuren levendiger maakt, en het oppervlak glanst meer. Een nadeel is dat de initiële aankoop van een UV-droger een stuk hoger is dan een laminator. Dit kan op lange termijn wel teruggewonnen worden door de lagere operationele kosten. Vooral voor bedrijven met een hoge bezettingsgraad op de *UV-coater* of laminator kan het voordelig zijn om een *UV-coater* aan te kopen. (GRAPHIC ARTS) In veldproeven werd al ondervonden dat door het

veelvuldig plooien delaminatie kan optreden waardoor de module bloot komt te liggen. Dit zal de duurzaamheid en de werking van de technologie sneller doen afnemen. (KREBS, F.C., FYENBO, J., TANENBAUM, D.M., GEVORGYAN, S.A. et al., 2011)

## 6. Technologieën

Onder dit hoofdstuk worden enkele *printed electronics* technologieën onder de loep genomen.

### 6.1 Elektroluminescentie

Om een beter inzicht te krijgen in de werking van elektroluminescentie of *light emitting capacitors* (LEC) worden de verschillende ontwikkelingen toegelicht sinds het ontdekken van de technologie om uiteindelijk aan te komen bij de huidige structuur en applicaties.

#### 6.1.1 Historiek

De rijke geschiedenis van elektroluminescentie vindt zijn oorsprong al in 1907. Kapitein Henry Joseph Round zag voor de eerste keer licht in siliciumcarbide (SiC). Door andere wetenschappers werd dit fenomeen ook nog enkele malen geconstateerd. (HART, J.A., LENWAY, S.A., MURTHA, T., 1999)

Het écht ontstaan van het vakgebied van elektroluminescentie is door velen toegeschreven aan Destriau. Hij was de eerste die zinksulfide scheidde van de elektroden door een isolator, dit onder grote spanning zette en daarbij licht zag. Eind jaren 50 werd er voor het eerst een dunne film ontwikkeld van zinksulfide, gedoteerd met mangaan. Hiermee werd ontdekt dat dunne films efficiënter waren. Deze uitvinding werd gedaan door Vlasenko en Popkov. (ONO, Y.A., 1995)

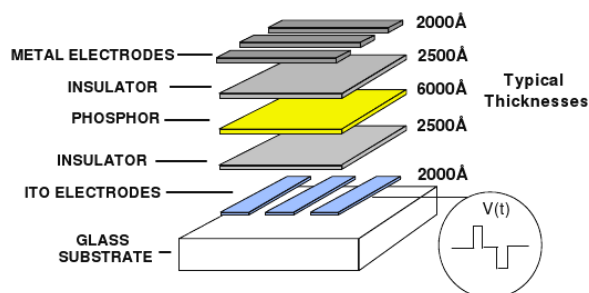
Russ en Kennedy bedachten het plaatsen van isolerende lagen rond de fosforlaag. Midden jaren 60 kon het bedrijf Sigmatron een dunne film ontwikkelen, deze applicatie kon echter niet gecommmercialiseerd worden. Er waren tot op dat moment twee grote problemen. Het belangrijkste probleem was dat de betrouwbaarheid moest verhogen. De toepassingen draaien op hoge spanning en er was een hoge waarschijnlijkheid dat de applicaties snel defect zouden raken. Het tweede probleem was het bekomen van hoge spanning *drivers*. De twee grote producenten van elektroluminescente displays, Sharp en Planar, losten dit op door ofwel dit onderdeel zelf te produceren ofwel aan te kopen bij

Texas Instruments. In 1985 werden de eerste displays op de markt gebracht door Sharp en Planar. Vanaf 1981 konden er ook applicaties gemaakt worden met licht in meerdere kleuren. Het kleurenpalet werd pas veel uitgebreider na de ontdekking van blauwe fosfor. (HART, J.A., LENWAY, S.A., MURTHA, T., 1999)

Elektroluminescentie (EL) is een van de oudste *printed electronics* technieken en is bijgevolg ook al veel bestudeerd en gedocumenteerd. In tegenstelling tot de gloeilamp is luminescentie licht waarvan de oorzaak niet warmte is. Het zijn dus alle vormen van zichtbare stralingsenergie die niet veroorzaakt worden door temperatuur. Er zijn vele soorten luminescentie, maar wat hier besproken wordt, is elektroluminescentie. Hierbij wordt door het genereren van een elektrisch veld op een materiaal licht gevormd zonder de opwekking van warmte. Bij elektroluminescentie vallen geëxciteerde atomen terug in de grondtoestand, waarbij dan energie wordt vrijgegeven in de vorm van licht. Elektroluminescentie omvat ook de licht emitterende diodes (LED), die licht geven wanneer een stroom gezet wordt op een p-n junctie van een halfgeleider. Het wordt ook gebruikt voor het maken van displays. De meeste elektroluminescente toepassingen werken op wisselstroom, maar er zijn er ook die op gelijkstroom lopen. (HART, J.A., LENWAY, S.A., MURTHA, T., 1999)

### 6.1.2 Basisstructuur en werking

Er zijn enkele basisstructuren die voor elke *light emitting capacitor* (LEC) gelden. De monochrome structuur voor *thin film electroluminescence* (TFEL) geldt als algemene opbouw voor een LEC. Om efficiënt bepaalde kleuren te kunnen uitzenden zijn ook andere structuren ontwikkeld.



**Figuur 15: Basisstructuur LEC.**

Bron: (HART, J.A., LENWAY, S.A., MURTHA, T., 1999)

Een monochrome basisstructuur voor *thin film electroluminescence* bestaat uit een substraat en vijf geprinte lagen en geeft één kleur licht af. De structuur wordt weergegeven in figuur 15. De fosforlaag is de laag die onder hoge spanning een kleur gaat emitteren. Dit is niet een laag die fosforelementen bevat, maar dit duidt enkel op het feit dat een fosfor een chemische verbinding is met lichtgevende capaciteit. De middelste laag wordt afgeschermd door aan elke kant een isolator te plaatsen. Op deze manier zullen er geen spanningsoverslagen zijn naar de elektroden toe. Dit is essentieel voor de levensduur en betrouwbaarheid van het product. De metaalelektrode bovenaan (kathode) en doorzichtige elektrode onderaan (anode) zorgen voor de structuur van een condensator. Het gebruikte substraat is glas. (PAKKALA, A.).

Als fosforlaag wordt vaak de verbinding Zinc Sulfide (ZnS) gedoteerd met Mangaan (Mn) genomen. Door de spanning op het materiaal op te voeren, worden door de elektronen geëxciteerde Mn-atomen verkregen in het ZnS. Telkens als de toegepaste spanning de minimale drempelspanning van ongeveer 200 Volt overtreft, wordt er een lichtpuls uitgezonden. De geëxciteerde Mn-atomen geven dan hun energie vrij in de vorm van licht. Het uitgezonden lichtspectrum van ZnS:Mn is voornamelijk geel. De kleur kan aangepast worden door het gebruik van een ander fosfortype en de golflengte van de spanning. (ABILEAH, A., HARKONEN, K., et al., 2008)

#### 6.1.2.1 Gekleurde TFEL

Er zijn twee opties voor het emitteren van verschillende kleuren. Men creëert een bepaalde kleur door de selectie van de juiste fosfor en door *patterning* van fosfor en isolator. De tweede optie is dat er gebruik gemaakt wordt van een witte fosforlaag die door middel van een filter de gevraagde Rood Groen Blauw (RGB) kleur aangeeft. De twee onderzoeken verliepen parallel en werden uitgebreid onderzocht. (KING, C.N., 2012)

##### 6.1.2.1.1 Fosforen voor verschillende geëmitteerde kleuren

Voor elke kleur werd er geëxperimenteerd met verschillende fosforen om zo te zien welke fosfor het meeste potentieel vertoonde voor een bepaalde kleur te emitteren. De kleur die gegenereerd werd, werd aangegeven in het *International Commission on Illumination*



(CIE) kleurdiagram. Daarbij werd er ook gekeken naar de intensiteit van de uitgestraalde kleur. Voor blauw konden initieel niet zo hoge intensiteiten gegenereerd worden. Na enkele ontdekkingen binnen het TFEL-gebied vond een onderzoeksgroep van de Meiji University betere resultaten in een toestel met diëlectrische lagen in plaats van TFEL-isolatoren. De structuur komt daarbuiten overeen met de TFEL-structuur. Voor de witte kleur zijn er twee mogelijkheden. De fosfor met de beste luminescentieresultaten is echter geen helder wit. In onderstaande tabel 2 worden de verschillende fosforen weergegeven met de daarbij horende resultaten.

Emission Color	Phosphor Material	CIE X	CIE Y	Luminance (nits @ 60Hz)
<b>Yellow</b>	ZnS:Mn	0.50	0.50	400
<b>Red</b>	ZnS:Mn/Filtered	0.65	0.35	70
	CaSSe:Eu	0.66	0.33	25
<b>Green</b>	ZnS:TbOF	0.30	0.60	100
	ZnS:Mn/Filtered	0.47	0.53	160
	SrS:Ce	0.28	0.53	110
<b>Blue</b>	SrS:Ce	0.19	0.36	100
	SrGa <sub>2</sub> S <sub>4</sub> :Ce	0.15	0.10	5
	CaGa <sub>2</sub> S <sub>4</sub> :Ce	0.15	0.19	10
	SrS:Cu	0.17	0.16	28
	BaAl <sub>2</sub> S <sub>4</sub> :Eu	0.12	0.11	113*
<b>White</b>	SrS:Ce/ZnS:Mn	0.46	0.50	470
	SrS:Cu/ZnS:Mn	0.45	0.43	240

\* TDEL Device Structure

**Tabel 2: Overzicht van emissie van actieve fosforen.**

Bron: (KING, C.N., 2012)

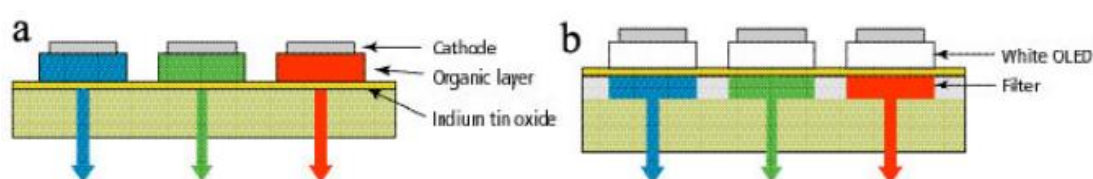
In Figuur 16 a) staat een voorbeeld van patterning van verschillende fosforen om een full color scherm te verkrijgen.

6.1.2.1.2 Kleur door witte emissie

Deze manier van het uitstralen van gekleurd licht in TFEL-toepassingen heeft de bovenhand genomen op de vorige techniek. De reden hiervoor is dat het zonder *patterning* van de fosfor en isolatoren de normale productievogorde van een TFEL-toepassing kan houden. Als laatste stap wordt er enkel nog een RGB-filter over gelamineerd die door middel van *patterning* voor de juiste kleur zal zorgen. (TÖRNQVIST, 2005) Patterning wordt gebruikt om drie verschillende kleuren te genereren, namelijk de

drie kleuren van de RGB-filter. In een full-color OLED (zelfde principe als LEC voor kleuren te genereren) worden de drie kleuren door elkaar geprint en apart gestacked zodat een groot kleurenpallet kan bekomen worden door het oplichten van meerdere pixels. Die aparte opstapeling van lagen per kleur is de patterning. In Figuur 16 b) staat een voorbeeld van full color patterning met een RGB filter. (HONGZHENG, J., 2009)

Tijdens het onderzoek van Törnqvist in 2005 was de gebruikelijke fosfor voor *color by white* veruit het meeste efficiënt met de fosfor SrS:Ce/ZnS:Mn. Maar door verder onderzoek naar SrS:Cu/ZnS:Mn zou het kleurenpallet wel eens verder uitgebreid kunnen worden. (KING, C.N., 2012)



**Figuur 16: Patterning bij full color OLED-schermen.**

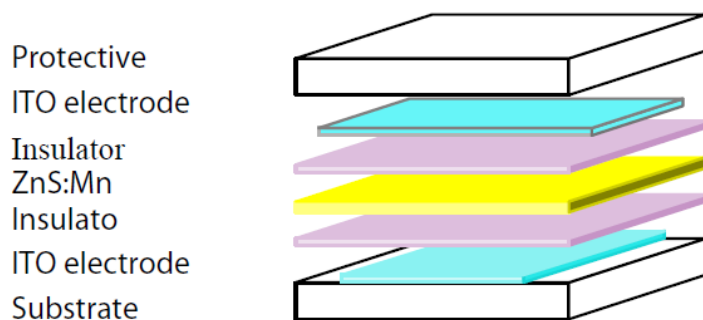
Bron: (HONGZHENG, J., 2009)

Een tweede voordeel is dat het substraat geen glas hoeft te zijn. De mogelijkheid bestaat ook om een *silicon wafer* te gebruiken. Dit heeft de naam gekregen van *active matrix electroluminescence* (AMEL). De actieve matrix is een aandrijfmethode die als grote voordeel biedt dat er veel hogere resoluties behaald kunnen worden. (TÖRNQVIST, 2005)

### 6.1.3 Toepassing: transparante elektroluminescente applicaties

Om een transparante display te verkrijgen, wordt de structuur van de LEC aangepast. Alle niet-transparante lagen worden vervangen door een transparante laag. De elektroden zijn in dit geval dus beide Indium Tin Oxide (ITO). Zowel het substraat als de laatste bescherm laag zijn dus ook doorzichtig. Een cross-sectie van de structuur wordt in figuur 17 weergegeven. Transparante toepassingen kunnen niet gemaakt worden met niet-emitterende technologieën zoals Liquid Crystal Display (LCD) omdat deze een *backplane* vereisen. Een ander voordeel van elektroluminescentie is dat het kan blootgesteld worden aan hoge temperatuur en vrij robuust is, dit kan gebruikt worden om het te gebruiken voor een breder gamma aan toepassingen. Er zijn twee implicaties opgetreden bij het ontwikkelen van de toepassingen. Het eerste is het *pipe-lining* effect. Interne reflecties kunnen ervoor zorgen dat het licht op en neer gekaatsd wordt tussen de

verschillende lagen om uiteindelijk de weg naar buiten te vinden. De lagen worden geoptimaliseerd en er wordt gebruik gemaakt van non-scattering fosforen en anti-reflectieve *coating* op de buitenste lagen om dit effect te minimaliseren. Een ander aspect is dat de fosforlaag heel egaal moet zijn zodat ook daar geen *scattering* optreed. (ABILEAH, A., HARKONEN, K., PAKKALA, A., SMID, G., 2008)



**Figuur 17: Structuur transparante elektroluminescente display.**

Bron: (ABILEAH, A., HARKONEN, K., PAKKALA, A., SMID, G., 2008)

Concrete toepassingen kunnen eventueel auto displays zijn met de analoge meters op. Een andere mogelijkheid zijn toepassingen om objecten achter het scherm te lokaliseren. Elektroluminescentie heeft een grote verdraagzaamheid voor temperaturen. Dit laat toe dat bijvoorbeeld het glas onder hoge temperatuur nog kan vervormd worden na de productie van de LEC. Dit kan gebruikt worden om enkele design toepassingen te ontwikkelen. (ABILEAH, A., HARKONEN, K., PAKKALA, A., SMID, G., 2008)

## 6.2 Organic light emitting diode (OLED)

De tweede technologie die besproken wordt, is net als elektroluminescentie ook een lichtbron. In plaats van het gebruik van fosforen, worden hier voor de lagen tussen de anode en kathode organische materialen gebruikt.

### 6.2.1 Historiek

De geschiedenis van de OLED wordt vaak gekaderd binnen het domein van elektroluminescentie. De twee technologieën zijn duidelijk verweven bij startend onderzoek. De eerste organische elektroluminescente cel werd gemaakt in 1953 door Bernanose en zijn onderzoeksgroep. Dit was een cel werkend op wisselstroom. De eerste gelijkstroomcel werd tien jaar later ontdekt door Pope en zijn collega's. Later werden er twee grote stromingen gevormd, die de grondlegging vormden voor de huidige commerciële toepassingen : namelijk *Small Molecules* OLED (SM-OLED) en de *Polymer LED* (PLED). (SHINAR, J., 2004)

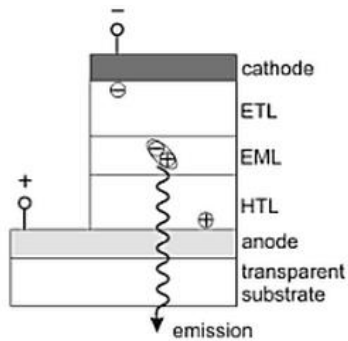
In 1987 verscheen het eerste werk over hoog-efficiënte OLED's die een groen licht emitteerden vanuit een dubbele organische lagenstructuur. (TANG, C.W., VANSLYKE, S.A., 1987) Daarop kwam er snel een vervolg naar onderzoek met meerdere polymere lagen. (TANG, C.W., VANSLYKE, S.A., 1989) Dit is het begin van SM-OLED

De andere stroming vond zijn oorsprong in 1990 met het onderzoek van het gebruik van polymeren in OLED's. Het eerste geconjugeerde polymeer wat gebruikt werd, is Para-Phenylene Vinylene (PPV). (BURROUGHES, J.H., BRADLEY, D.D.C., BROWN, A.R., MARKS, R.N., MACKAY, K. , 1990)

De laatste jaren lijken de SM-OLED's de bovenhand genomen te hebben omdat ze efficiënter zijn en de levensduur langer is. (FYFE, D., NICKLIN, T., 2004) (OLED-INFO, B) PLED's hebben wel een groter potentieel voor massaproductie aangezien het gebruikt kan worden in *roll-to-roll* processen. (OLED-INFO, A)

### 6.2.2 Basisstructuur en werking

De basisstructuur van een *bilayer* OLED bestaat uit vijf lagen. Namelijk het substraat, de anode (meestal ITO), de *hole transport layer* (HTL), de *electron transporting layer* (ETL) en de kathode. (SHINAR, J., 2004) Om betere prestaties te verkrijgen kan het ook zijn dat er overgeschakeld wordt naar structuren met meer dan twee organische lagen. In onderstaande figuur wordt de lagenstructuur van een OLED weergegeven met een aparte *emission layer* (EML). In de *bilayer* structuur is de emissie laag de *electron transport layer*. De weergegeven structuur bestaat dus uit zes lagen en wordt grafisch weergegeven in figuur 18. (KRÖGER, M., 2007)



**Figuur 18: Basisstructuur OLED.**

Bron: (KRÖGER, M., 2007)

Als een externe voltage op deze structuur wordt gezet, worden er elektronen geïnjecteerd vanuit de kathode in de ETL en gaten geïnjecteerd in de HTL door de anode. Het proces van injectie van gaten en elektronen kan versterkt worden door het toevoegen van *hole* en *electron injection layers*, die respectievelijk een laag *Highest Occupied Molecular Orbital* (HOMO) level en een hoog *Lowest Unoccupied Molecular Orbital* (LUMO) level hebben met daartussen de *band gap*. De reformatie van gaten en elektronen gebeurt in de emissiel laag. Om migratie van de gaten en elektronen naar de andere pool te verhinderen, kunnen er nog *blocking layers* worden toegevoegd die verhinderen dat er niet-lichtgevende deeltjes ontstaan aan de andere pool. Door de recombinatie van de gaten en elektronen worden er excitonen gevormd. De terugval naar hun grondtoestand geeft licht af. (AMMERMANN, D., BÖHLER, A., WOLFGANG, K., 1995)

### 6.2.3 Productie

Uit verschillende onderzoeken naar printtechnieken voor OLED's blijkt dat er nog enkele opties zijn voor de productie. Gravure *coating* blijkt een goede optie voor massaproductie met *roll-to-roll processing* omdat aan een hoge snelheid, dunne lijnen met hoge accuraatheid geprint kunnen worden. (KOPOLA, P., TUOMIKOSK, M., SUHONEN, R., MAANINEN, A., 2009) SM-OLED wordt vaak gefabriceerd met vacuümdepositie door het opdampen van de verschillende lagen. Polymere OLED's worden dan weer vaker met *spincoating* gemaakt. *Screen printing* en *ink jet printing* zijn ook mogelijke technieken. (MÜLLER, D.C., FALCOU, A., RECKEFUSS, N., ROJAHN, M., et al., 2003)

#### 6.2.4 AMOLED en PMOLED

Er zijn twee soorten aandrijfmethoden voor OLED's, de passieve matrix OLED (PMOLED) en de actieve matrix OLED (AMOLED). Beiden gebruiken een TFT-scherm en Line-scanning controle. Daarbij verander je de pixels rij per rij. Bij passieve matrixen zijn de rijen meestal uitgeschakeld tussen veranderingen, dan is er meer spanning nodig om de pixels meer helder te krijgen. Dit is niet efficiënt en beperkt de mogelijke resolutie. De AMOLED displays gebruiken een '*Thin-film transistor*' (TFT) met opslagcapaciteit. Dit zorgt ervoor dat de pixelinformatie ten allen tijde bewaard wordt. Deze zijn bijgevolg efficiënter en meer geschikt voor grote displays met hoge resoluties maar zijn duurder dan de PMOLEDS. (OLED-INFO, A)

Bij PMOLED worden pixels apart gedefinieerd door de rijen in de anode en de kolommen in de kathode. Elke rij van de anode moet apart aangeslagen worden waardoor het aantal rijen dat moet worden aangeslagen per seconde omgekeerd evenredig is met de responstijd. De lichtintensiteit van de pixels die moeten worden opgelicht in elke rij, wordt bepaald door de stroom die op de overeenkomstige kathodekolom wordt gezet. Door deze eigenschappen is de efficiëntie van PMOLED's veel te laag voor een toepassing met een hoge resolutie. Het is voordeliger om gebruik te maken van een AMOLED. Dit systeem zorgt permanent voor de aandrijvingsstroom die nodig is in plaats van de *high peak luminance* van PMOLED. (KRÖGER, M., 2007)

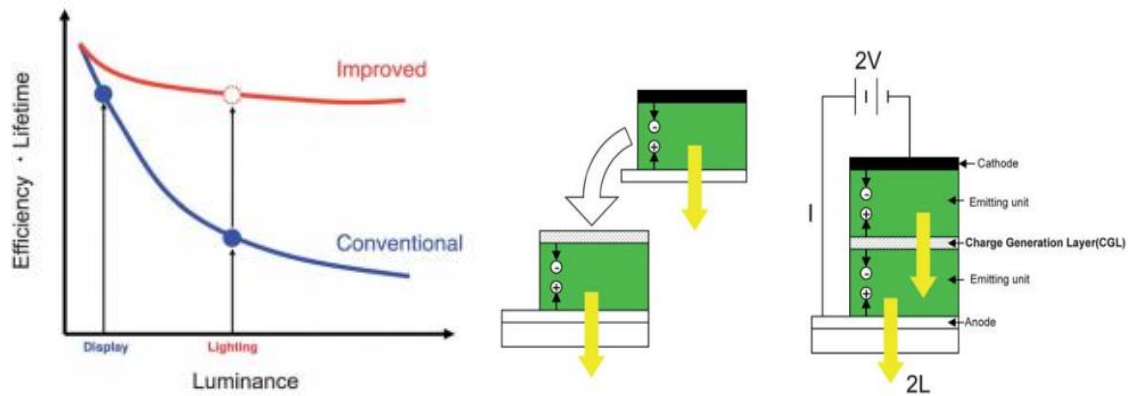
#### 6.2.5 Full-color OLED

Er zijn twee manieren voor het genereren van verschillende kleuren in een OLED-scherm. De eerste manier is door de drie verschillende RGB kleuren te maken door drie verschillende emitters in sub-pixels te gebruiken die rood, groen en blauw licht uitzenden. De combinaties van de drie sub-pixels kunnen dan de verschillende kleuren emitteren. Een andere methode is één soort pixel maken, die wit licht uitzendt. Door dan een RGB-filter te gebruiken, kan men ook weer die verschillende kleuren emitteren (zie figuur 16). Uit onderzoek in 2008 blijkt dat de lichtefficiëntie van de methode met de RGB-filter slechts tien procent bedraagt van de efficiëntie met drie sub-pixels. (XIONG, Y., XU, W., LI, C., LIANG, B. et al., 2008)

## 6.2.6 Toepassing van witte OLED's voor binnenhuisverlichting

Een groot deel van de elektriciteit die mensen verbruiken gaat naar verlichting. *Organic Solid State Lightning* (OSSL) krijgt ten gevolge van de grotere aandacht voor elektriciteitsverbruik meer en meer aandacht. In Amerika is een programma opgestart door de *Department of Energy* om tegen 2025 *solid state lighting* te ontwikkelen voor binnenhuisverlichting. De richtlijnen die zijn opgesteld zijn minimaal een lichtefficiëntie honderdtwintig lm/W en een lichtintensiteit van 850 cd/m<sup>2</sup>. De levensduur 20.000 uren met een maximale daling van twintig procent lichtintensiteit. Ten opzichte van de verlichting gebruikt in 2005, zou het elektriciteitsverbruik met minstens vijftig procent dalen. (JOHNSON, A.R., 2008)

Om *solid state lightning* efficiënter te maken heeft recent onderzoek uitgewezen dat *phosphorescent* OLED's betere resultaten behalen. De fluorescente emitters van de andere OLED types worden vervangen door *phosphorescent* emitters die tot vier maal de efficiëntie van OLED's verhogen. Fluorescentie geeft onmiddellijk licht af en bij fosforescentie wordt de energie niet onmiddellijk vrijgegeven als licht. De laatste resultaten wijzen uit dat er een lichtefficiëntie kan bereikt worden van honderd en twee lm/W en een lichtintensiteit van duizend cd/m<sup>2</sup>. De vereisten om OLED's langer bruikbaar te maken, is een nieuwe techniek ontwikkeld. In de figuur onderaan ziet u dat de nieuwe OLED's, ofwel *multi photon emission* (MPE) OLED, betere resultaten halen. Er wordt eigenlijk een tandem van twee OLED's op elkaar gemaakt. Tussen de twee OLED's wordt er een *Charge Generating Layer* gemaakt. Die gaat onder spanning gaten en elektronen aanbrengen in respectievelijke de laag erboven en de laag eronder zodat er twee maal een recombinatie gebeurt. Dit levert een langere levensduur op. Een uitgezette grafiek van de verbeterde levensduur en de structuur van MPE-OLED worden afgebeeld in figuur 19 (SASABE, H., KIDO, J., 2013)



**Figuur 19: Efficiëntie - Levensduur uitgezet ten opzichte van lichtintensiteit en een overzicht van de opbouw van MPE-OLED.**

Bron: (SASABE, H., KIDO, J., 2013)

### 6.3 Organic photovoltaics (OPV)

De fotovoltaïsche zonnepanelen hebben ondertussen al veel belangstelling gewekt in België. Subsidies zorgden ervoor dat zowel de privé- als de bedrijfssector grote investeerders deden in zonnepanelen al namen die af naarmate de prijs van de groenestroomcertificaten afnamen. (HABITOS) De laatste jaren is er extensief onderzoek gedaan naar organische zonnecellen omdat dit een technologie is die een grote doorbraak kan betekenen voor producten ondersteund met zonnecellen met lage kosten en de potentiële voordelen van de flexibiliteit, lichtheid en compacte afmetingen. De eerste stap zal het veroveren van de markt van de consumentenelektronica worden. (CMK, UHASSELT, EES, K.U. LEUVEN, 2012) (OLED-INFO, C)



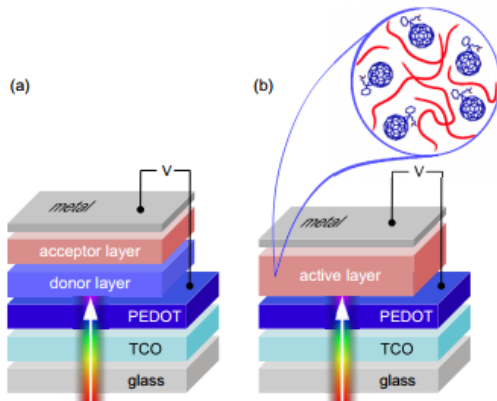
### 6.3.1 Historiek

De grondlegging voor de organische zonnecel werd gedaan in 1954, maar slechts weinigen waren stabiel. Op het einde van de jaren zeventig werd de geleiding van de polymeer polyacetylene gedoteerd met halogenen ontdekt waarvoor de Nobelprijs voor Chemie verkregen werd in 2000. De eerste organische zonnecellen waren gebaseerd op een enkelvoudige, actieve laag, tussen twee elektroden. Het introduceren van een tweede organische semi-conductorlaag in 1986 was een grote vooruitgang voor de omzettingsefficiëntie. De efficiëntie die toen behaald , was nog steeds beperkt tot één procent. In de jaren negentig werd de structuur van bulk heterojunctie geïntroduceerd. (DEIBEL, C., DYAKONOV, V., 2010)

### 6.3.2 Basisstructuur en werking

De OPV-structuur is niet zo verschillend van de vorige structuren. Er wordt ook gebruik gemaakt van een anode en kathode, bestaande uit respectievelijk ITO en een metalen elektrode. Het licht wordt opgevangen door de kant van het glazen substraat. Tussen de elektroden zit de organische actieve laag. (KRONHOLM, D., HUMMELEN, J.C., 2008) Vaak worden er nog extra lagen voorzien. Tussen de ITO en de actieve laag komt vaak nog een PEDOT:PSS laag die *electron blocking* en *hole collecting* gedrag verbeterd. Deze laag is ook doorzichtig. Voor de fotoactieve laag wordt er vaak gebruik gemaakt van de bulk heterojunctie configuratie. Deze methode maakt gebruik van een polymere *electron donor* en een fullerene *electron acceptor* gemengd in één laag. Een goed onderzocht domein is de actieve laag P3HT:PCBM. (MEIER, R., BIRKENSTOCK, C., PALUMBINY, C.M., MÜLLER-BUSCHBAUM, P., 2012) Er zijn ook *bilayer* of *multilayer* structuren mogelijk, maar de hogere efficiënties worden behaald met bulk heterojuncties. (CHOY, 2013) Beide structuren worden weergegeven in figuur 20. De topelectrode is een metaal elektrode, zoals bijvoorbeeld aluminium. Net als bij de OLEDs bestaat er een tandemcel met een intermediäre laag die de twee cellen met elkaar verbindt. In single bulk heterojunctie solar cells zijn ondertussen omzettingsefficiënties tot 6 procent behaald. Door het stapelen van materialen met verschillende band gaps in *tandem cells* kan er meer licht opgevangen worden en stijgt de efficiëntie. (HELGESEN, M., SONDERGAARD, R., KREBS, F.C., 2009) Uit onderzoek -gepubliceerd in 2012- bleek dat recentere efficiënties de kaap van de 9 procent behalen. Dit percentage gaat over de volgende twee tot drie jaren nog

stijgen tot elf procent. De levensduur van de OPV-cellen zou al kunnen oplopen tot tien jaar met flexibele substraten en twintig jaar met glazen substraten. Hierbij moet wel de assumptie gemaakt worden dat de active laag *photo-stable* blijft. (GAUDIANA, R., 2012)



**Figuur 20: Basisstructuren met a) acceptor- en donorlaag of b) bulk heterojunctie.**

Bron: (DEIBEL, C., DYAKONOV, V., 2010)

Het proces van het omzetten van licht in elektriciteit kan uitgelegd worden aan de hand van een aantal stappen. Eerst wordt het licht opgevangen door de donorlaag en *excitons* worden gevormd. Er treedt dan diffusie op bij de *excitons* naar de donor:acceptor laag waarbij vrije dragers worden gecreëerd. Draggers worden dan getransporteerd naar de anode door de acceptor voor gaten en dragers worden naar de kathode gevoerd door de donor voor de elektronen. De tussenlagen tussen de donor:acceptor en de elektroden zorgen ervoor dat er unipolaire extractie is naar de elektroden toe. (STEIM, R., KOGLER, R.F., BRABEC, C.J., 2010)

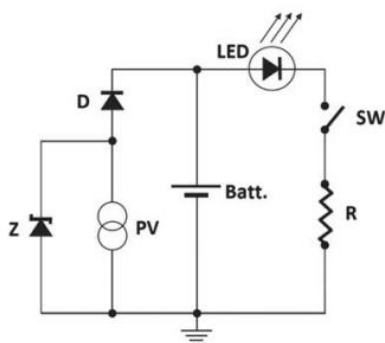
Voor de fabricatie van OPV-cellen werd er tot voor kort bijna altijd gebruik gemaakt van *spin coating*. Die productie werd dan ook vooral uitgevoerd op labschaal. Recent zijn er ook technieken verschenen waarbij *doctor blading* gebruikt wordt. *Ink jet printing*, *knife coating*, *spin coating*, *pad printing*, *gravure printing* en *screen printing* hebben de mogelijkheid om uit te groeien tot printtechnieken die geschikt zijn voor massaproductie in OPV. De meeste technieken zijn relevant voor meerdere technologieën, maar er zijn ook enkele printtechnieken waarvoor de relevantie uniek is voor OPV-fabricatie. Het zijn technieken die het mogelijk maken om verschillende lagen tegelijkertijd te printen. *Slot die coating* is geschikt voor het printen in één dimensie, wat belangrijk is voor de structuur van de OPV-cellen aangezien er een strepenpatroon gevormd moet worden. (KREBS, F.C., FYENBO, J., JORGENSEN, M., 2010)

In de labotesten worden omzettingsefficiënties behaald van meer dan acht procent. In industriële toepassingen ligt dit een stuk lager, namelijk rond de één tot twee procent. Dit geeft het probleem van de schaalbaarheid aan. Door printtechnieken toe te passen die hogere productiesnelheden halen, daalt de kwaliteit van de geprinte films. (DAM, H.F., KREBS, F.C., 2012)

### 6.3.3 Toepassing lamp met OPV

In het kader van goedkope, duurzame energiebronnen voor lichttoepassingen zijn reeds een aantal toepassingen ontworpen om *light emitting diodes* (LED) aan te drijven met OPV. De OPV-component is echter slechts een bij-schakeling van de totale, meer complexe elektrische kringloop. De LED wordt aangedreven door een batterij, die opgeladen wordt door de elektriciteit, opgewekt door de OPV-component. De batterij biedt het praktische voordeel dat de energie opgeslagen kan worden en aangesproken kan worden wanneer de gebruiker het lampje nodig heeft. (KREBS, F.C., NIELSEN, T.D., FYENBO, J., WADSTROM, M., et al., 2009)

Een voorbeeldontwerp van de elektronische schakeling wordt in figuur 21 weergegeven. In de schakeling wordt ook een *blocking diode* (D) opgenomen om ervoor te zorgen dat de energie niet terug naar de sub-schakeling vloeit vanuit de batterij. De aandrijving van de LED wordt onder controle gehouden door een weerstand (R). Een laatste veiligheid die wordt ingebouwd is een Zener diode (Z) om ervoor te zorgen dat de batterij niet overladen wordt. De andere elementen in het schematisch diagram zijn de batterij (Batt.), de schakelaar (SW) en de aarding. (KREBS, F.C., FYENBO, J., TANENBAUM, D.M., GEVORGYAN, S.A. et al., 2011)



**Figuur 21: Elektronische schakeling lampje met OPV.**

Bron: (KREBS, F.C., FYENBO, J., TANENBAUM, D.M., GEVORGYAN, S.A. et al., 2011)

In het kader van het project "lighting for Africa" wordt ook veldresearch gedaan, door de mensen in Afrika de producten te laten proberen. De onderzoekers trachten een doorbraak te creëren door de geprinte aandrijving van lichtbronnen goedkoper te maken dan het alternatief, namelijk petroleum. Petroleum voor het aandrijven van lampen brengt een jaarlijkse kost mee tussen de 28 en 56 euro per gezin in Afrika. Om competitief te zijn zou de prijs van een lampje onder de zeven euro moeten dalen en liefst verder afnemen tot drie euro. De OPV-module heeft momenteel een kostprijs van 11,57 euro. Op termijn wordt mogelijk geacht de prijs van de OPV-module serieus terug te dringen door verdere ontwikkeling en opschaling. De doelstelling van drie euro per lampje zou binnen de mogelijkheden vallen. (KREBS, F.C., NIELSEN, T.D., FYENBO, J., WADSTROM, M., et al., 2009)

Uit veldtesten in 2011 blijkt dat 98 procent van de producten nog steeds operationeel zijn na één jaar en dat er slechts 0,1 procent gefaald zijn. De OPV-cellen worden in dit project volledig met *roll-to-roll* processing geproduceerd. Deze snelle manier van produceren zal moeten zorgen voor de opschaling en daling van de kostprijs van de OPV-modulen. Dit resulteert echter wel in lage omzettingsefficiëntie van de OPV module van ongeveer twee procent, waarbij in 2011 de efficiëntie op labschaal rond de acht procent ligt. (KREBS, F.C., FYENBO, J., TANENBAUM, D.M., GEVORGYAN, S.A. et al., 2011)



## 7. Technieken voor het ondersteunen van de investeringsbeslissing

### 7.1 Terugverdiëntijd

Bij investeringen is het belangrijk om te weten binnen welke periode de investering terugverdiend kan worden. *Pay-back* methode is een handige en simplistische methode om de terugverdiëntijd te achterhalen. De winsten per jaar ten gevolge van de investering worden opgeteld en vergeleken met de aanschaffingskost. (MERCKEN, R., 2004) Bij een constante nettowinst kan de terugverdiëntijd bepaald worden door een breuk op te stellen met de investeringskost in de teller en de nettowinst in de noemer. De terugverdiëntijd wordt dan weergegeven in jaren. In de meeste toepassingen zijn de jaarlijkse nettowinsten niet constant omdat bepaalde determinanten van de kosten en opbrengsten variëren. Wanneer de som van de jaarlijkse nettowinsten groter is dan de aankoop prijs van de investering, is de investering terugbetaald. (YE, S., TIONG, R., 2000) Dit is een eenvoudige methode die echter geen rekening houdt met de tijdswaarde van geld. (DE GELISSEN, 2007)

### 7.2 De netto contante waarde

De formule van de netto contante waarde is als volgt:

$$NCW = A_{1-r} * CF_1 + A_{2-r} * CF_2 + A_{3-r} * CF_3 + \dots + A_{n-r} * CF_n \quad (1)$$

$A_{n-r}$  geeft de actuele waarde van één euro in jaar n met een discontovoet r. Op die manier worden de  $CF_n$ , namelijk de jaarlijkse casflows tot in jaar n, verdisconteerd naar de waarde die ze hebben op dit moment. Meestal is dit het jaar van investering. (DE GELISSEN, 2007)

Om de  $A_{n-r}$  verder toe te lichten, wordt de volgende formule toegevoegd:

$$PV = \frac{C_n}{(1+r)^n} = A_{n-r} * C_n \quad (2)$$

De *present value* is gelijk aan de *cashflow* van een jaar  $n$  gedeeld door de verdisconteringsvoet plus één tot de macht van het jaar  $n$ . Dit levert de afzonderlijke verdisconteerde *cashflows* per jaar op. (MCLANEY, E., 2009)

De netto contante waarde is een methode die een goed overzicht geeft over de hele afschrijvingsperiode of levensduur van het project. Bij deze methode gaan de *cashflows*, die gedurende de levensduur van de investering worden gerealiseerd, verdisconteerd worden aan een intrestvoet. De *cashflows* geven het verschil weer tussen de inkomende en uitgaande kasstromen. De inkomende *cashflows* omvatten de inkomsten uit de verkoop van producten, die voortvloeien uit de investering. De uitgaande kosten bestaan uit alle uitgaven die er extra erbij komen indien de investering gemaakt wordt. Dit zijn zowel de variabele kosten, als de vaste kosten. Onder vaste kosten vallen bijvoorbeeld de vaste loonkosten en de aflossing van de leasing. Onder de variabele kosten, zitten onder andere de operationele kosten en aankoopkosten van de grondstoffen.

Het break-even punt ligt bij een netto contante waarde van nul. De netto contante waarde geeft bij dit punt weer dat de kosten gelijk zijn aan de opbrengsten door de jaren heen, rekening houdend met de tijdsdimensie. Als de netto contante waarde plus of min is dan is de het advies voor het investeringsproject respectievelijk voordelig of nadelig. Belangrijk is dat de afschrijvingen buiten beschouwing gelaten worden aangezien dit een kost is en geen kasstroom. De kostprijs van de investering wordt echter al integraal opgenomen in de *cashflow*tabel bij het betalen van de leverancier. Er wordt ook rekening gehouden met de vennootschapsbelastingen, deze worden op basis van de resultatenrekening uitgerekend. (MERCKEN, R., 2004)

Twee wederzijds uitsluitende projecten kunnen ook tegen elkaar afgewogen worden. Door na te gaan welk project de grootste netto contante waarde heeft, kan men besluiten welk project het voordeligst is. Het project met de hoogste NCW zal bijgevolg de voorkeur krijgen vanuit investeringsoogpunt.

Het bepalen van de intrestvoet is cruciaal in deze analyse. Meestal wordt dit gedaan met de intrestvoet die op het moment van de investeringsmogelijkheid geldt. Als het investeringsproject wordt verworpen, wil dit zeggen dat het voordeliger was om het geld op de bank te zetten tegen de intrestvoet, in plaats van de investering te maken. In het kader van een break-even analyse is het interessant om de *internal rate of return* te berekenen. Deze geeft weer wat het rendement op de *cashflows* moet zijn om break-even te draaien. De netto contante waarde bij verdiscontering tegen de *internal rate of return* is dan bijgevolg gelijk aan nul. Als de *internal rate of return* hoger ligt dan de

interestvoet is er een positieve netto contante waarde en kan er geconcludeerd worden dat het een goede investeringsoptie is. Als de interestvoet hoger ligt dan de *internal rate of return*, is het nadelig om de investering door te voeren.

De formule is als volgt:

$$\sum_{n=0}^i \frac{CF_n}{(1+r)^n} = 0 \quad (3)$$

De  $n$  staat voor het jaar. De  $i$  voor het laatste jaar, in deze case is dat tien.  $CF$  staat voor *cashflow* en de  $r$  staat voor de interne rentevoet. (MERCKEN, 2004)

De discountvoet (interestvoet) kan ook arbitrair gezet worden om een project strenger of gematigder te evalueren. Deze techniek oogst kritiek. Een hoge discountvoet levert een onderschatting op van de *cashflows* die verder in de toekomst liggen. Als de hoogste returns de laatste jaren behaald worden, zal het investeringsproject een hogere verwerpingskans hebben. De oorzaak ligt in de exponentiële toename van de noemer bij het verdisconteren. Op deze manier worden potentieel goede projecten misgelopen. (MERCKEN, R., 2004)

### 7.3 Monte Carlo simulatie

De definitie van een Monte Carlo simulatie kan omschreven worden als een model waarbij de veranderingen of de groei niet gebeuren in een vooraf te bepalen beweging. De veranderingen of groei gebeuren op stochastische wijze, waarbij een reeks willekeurige nummers gegenereerd worden. Een nieuwe reeks van willekeurige nummers geeft een nieuw resultaat dat binnen de statistieke foutmarge ligt van het vorige resultaat. (LANDAU, D.P., BINDER, K., 2009)

In de praktijk komt het zelden voor dat slechts één van de parameters variabel is. Voor de *case study* geldt dat een heel aantal parameters in het netto contante waarde model veranderen zoals verkoopprijzen, variatie in de grondstofprijzen, productiesnelheden,... . Bij een ingewikkeld model waarbij verschillende factoren variëren is het aan te raden een sensitiviteitsanalyse onder de vorm van Monte Carlo simulaties uit te voeren. Er worden netto contante waarden berekend met telkens een verschillende samenstelling van waarden van de factoren. Elke parameter van het proces krijgt bij gevolg een verdeling toegewezen. De netto contante waarden worden dan weergegeven als een verdeling. Uit



die verdeling kan dan afgeleid worden wat de kans is op een positieve netto contante waarde van de investering. Bij een hoge kans zal deze investeringsmogelijkheid aanvaard worden, bij een lage kans verworpen. Het kritisch percentage voor de aanvaarding of verwerping van de investeringsmogelijkheid kan vrij bepaald worden door de onderneming en berust op de tolerantie van risico. (HACURA, A., JADAMUS-HACURA, M., KOCOT, A., 2001)

Voor de *case study* wordt gebruik gemaakt van simulatiesoftware in Excel. Sinds de jaren 90' zijn een heel aantal softwarepakketten ontworpen voor het oplossen van lineaire en non-lineaire problemen. De eerste *solver* voor *spreadsheets* werd ontworpen door Frontline. Dit zorgde voor een snelle reactie van Microsoft, dat met zijn eigen *Solver* kwam voor Excel. Monte Carlo simulaties konden vanaf de jaren 2000 uitgevoerd worden in Excel. (THOMOPOULOS, N.T., 2013)

## 8. Lumoza NV gevalstudie

### 8.1 Bedrijf en probleemstelling

De onderneming LUMOZA NV werd opgericht in 2009 als een *spin off* van de Universiteit Hasselt en IMEC. Beiden zijn pioniers in het onderzoek naar *printed electronics*. Ze zijn de samenwerking in de vorm van een spin off begonnen om hun kennis uit onderzoek te valoriseren in commerciële producten. Als jonge onderneming kozen ze ervoor om de productie te outsourcen aan Artist Screen. Deze onderneming is reeds meer dan 40 jaar gespecialiseerd in printtechnieken, waaronder screen printing. Om meer controle te kunnen uitvoeren over de productie en het verbeteren van de kwaliteit werd beslist om een eigen productielijn aan te kopen. De vraag is of dit ook in economisch opzicht de juiste keuze is. Een investeringsanalyse zal dit mee duidelijk maken.

De markten waarin Lumoza NV actief is, zijn de verpakkings- en reclame-industrie. In de nabije toekomst willen ze uitbreiden naar binnenhuisarchitectuur. Momenteel passen ze vooral de *phosphor based electroluminescent* (EL) technologie toe om toepassingen te ontwikkelen (zie hoofdstuk 6.1). Deze technologie wordt ook wel light emitting capacitor (LEC) genoemd. Licht wordt geproduceerd zonder warmte te ontwikkelen. Verder is Lumoza NV ook gespecialiseerd in '*Light emitting diodes*' (LED's) (zie hoofdstuk 6.2) en '*radio frequency identification*' (RFID) tags. Deze tags kunnen gebruikt worden bij het registreren van producten en goederen. Bewegingssensoren en zonneceltoepassingen behoren ook tot de mogelijkheden.

### 8.2 Investeringskosten

De productielijn voor het maken van *printed electronics* bestaat uit minstens vier verschillende machines. De grootste investering is de printer en de droger. Verder moet er nog een digitale snij-en freesmachine aangekocht worden en een laminator. Als printer en droger werd er voor een screenprinter met droger gekozen van Thieme, die voor drie vierde geautomatiseerd is. De laminator werd aangekocht bij Seal en de digitale snijmachine bij Zünd. Alle onderdelen van de productielijn zijn voorzien op de doorvoer van substraten tot zestig centimeter op negentig centimeter. De investeringskosten worden in tabel 3 weergegeven.

Machine	Investering
Printer	€156.315
Droger	€92.490
Laminator	€5.000
Snijmachine	€85.000

**Tabel 3: Investeringsbedragen**

De printer en droger werden bij dezelfde leverancier aangekocht, waarbij een *package deal* gesloten kon worden die de prijs van beide machines samen terugbrengt tot 223.750. Deze twee machines werden in gebruik genomen door middel van een financiële leasing. Hierbij is een aankoopoptie bedongen om na vier jaar leasing, de machines definitief aan te kopen voor tien procent van de prijs van de packagedeal.

### 8.3 Producten

Lumoza NV richt zich vooral op de reclame- en verpakkingsmarkt. De producten die momenteel geproduceerd worden zijn oplichtende en geanimeerde banners, cd-hoesjes, posters en allerlei commercieel materiaal, dat de aandacht moet trekken van de consument.

Elektroluminescerende producten zijn zuinig in verbruik (afhankelijk van het aantal opgelichte pixels per regel) en hebben een lange levensduur. Planar geeft aan dat de lichtintensiteit vijf procent afneemt over de eerste duizend uren gebruik. Daarna neemt de achteruitgang af. Na honderdduizend uren zou de lichtintensiteit van de toepassing vijftien procent afgenomen zijn. Het onderzoek naar de exacte duurzaamheid van het product is nog niet afgelopen want het onderzoek loopt nog niet lang genoeg om de lichtintensiteit te laten zakken onder vijftig procent van de initiële lichtintensiteit. (PLANAR, 2008)

Figuur 22 geeft een geanimeerde reclameposter weer voor de film, *The Green Lantern*. Deze poster heeft in Duitse bioscopen gehangen. De verschillende onderdelen in de afbeelding lichten op aan de hand van een binair script, dat de commando's animaties aanstuurt.

De voorkeur van Lumoza gaat uit naar grote banners. Deze worden gedrukt in segmenten. De meest voorkomende formaten voor banners bestaan uit 16, 32 of 64 segmenten. Deze producten leveren de grootste marge op. De marges staan in tabel 4.

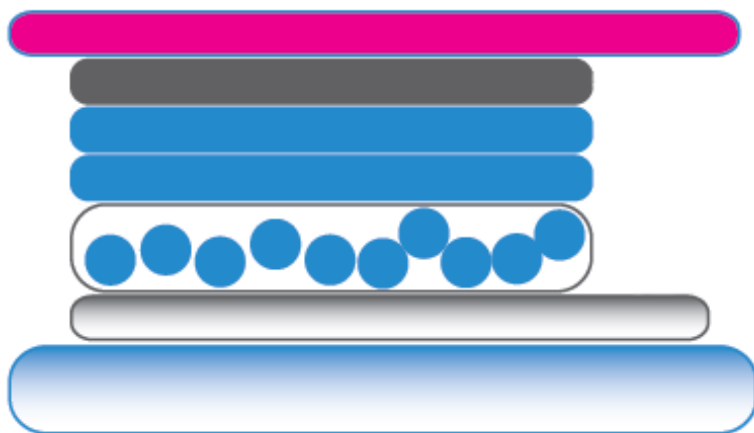
	Totale kosten	Opbrengst	Winst
16 segmenten	1.952,4	3.500	1.547,6
32 segmenten	3.250,1	7.000	3.749,9
48 segmenten	4.911,5	10.500	5.588,5
64 segmenten	6.201,5	14.000	7.798,6

**Tabel 4: Marges van de banners**



**Figuur 22: Lichtposter van de film The green lantern.**

De lagenstructuur van de banners beruften op de techniek van TDEL. Dit werd kort aangehaald in de literatuurstudie. Er wordt gebruik gemaakt van dikkere diëlectrische lagen om de prestaties van de elektroluminescente toepassing te verhogen. De structuur wordt in figuur 23 weergegeven.



**Figuur 23: Structuur LEC van Lumoza.**

De onderste laag van afbeelding is het substraat. Dit kan polyethyleentereftalaat PET of glas zijn. Daarop wordt de front elektrode bevestigd, namelijk ITO. Deze twee lagen zijn transparant om het licht langs deze kant uit de fosfor naar buiten te kunnen laten gaan. Lumoza gebruikt niet de *color by white* techniek om verschillende kleuren te genereren. Zij opteren ervoor om de meest geschikte fosfor te selecteren en te printen om de juiste kleur te verkrijgen. De blauwe bolletjes in de witte laag geven de dotatie van de fosfor weer. De twee diëlectrische lagen die hierop volgen, worden in het blauw weergegeven. Om schakeling rond te maken wordt er een back elektrode geprint die uit verschillende materialen kan bestaan. Dit kan zilver, koolstof of aluminium zijn. De roze laag is de gelamineerde laag om het geheel af te sluiten en te beschermen.

Er zijn vier verschillende formaten van banners. Zestien, tweeëndertig, achtenveertig en vierenzestig segment zijn de vier soorten, die een lichtdruk van ongeveer tien procent hebben. In tabel 5 wordt een overzicht gegeven.

	Grootte banner (m <sup>2</sup> )	Oppervlakte lichtdruk (m <sup>2</sup> )
<b>16 segmenten</b>	10	1
<b>32 segmenten</b>	20	2
<b>48 segmenten</b>	30	3
<b>64 segmenten</b>	40	4

**Tabel 5: overzicht oppervlakte lichtdruk per banner**

## 8.4 Overzicht processen

Voor er aan de *cashflows* gedacht kan worden, moeten eerst de verschillende processen in kaart gebracht worden. Het operationele verloop van de processen wordt belicht, met extra aandacht voor de tijd die besteed wordt aan de verschillende processen.

### 8.4.1 Printer en droger

Het productieproces start bij de lichtdruk en het drogen van de inkt. Per zestien segmenten worden er vijf substraten gebruikt om in het totaal een oppervlakte van één m<sup>2</sup> lichtdruk te bekomen. Voor de druk van de vijf panelen, inclusief *tooling*, wordt 1u24min nodig geacht. De *tooling*duur vertegenwoordigt één uur in de totaalduur van de printer. De *tooling* houdt een testdruk in en het instellen van de printer voor het te drukken proces. Voor elke zestien segmenten die er in grootte bijkomen, komt er nog een *tooling* uur bij. Op die manier heeft een tweeëndertig segment banner twee *tooling*-uren. De niet-*tooling*duur verdubbelt in dit geval ook naar achtenveertig minuten. Deze duur is berekend op een doorvoer van twaalf en half substraat per uur. Op deze tijd zijn alle benodigde lagen gedrukt en gedroogd. Dan is de module klaar voor de volgende processtappen. Om de tijdsberekeningen juist in kaart te brengen is de schaalbaarheid bekeken en kan er afgeleid worden dat de totale duur met hetzelfde veelvoud toeneemt als de grootte van de banner. Een opmerking die hierbij gemaakt moet worden, is dat voor meerdere identieke banners binnen één project niet telkens opnieuw een *tooling* dient gedaan te worden. Dus voor het printen van tien zestien segment banners zal er slechts één uur *tooling* nodig zijn en geen tien. De totale printduur van tien banners kan dus niet het tienvoud zijn van één banner. De *tooling*-duur zal onttrokken moeten worden aan de vermenigvuldiging van de print- en droogtijd. Voor de kostberekening wordt het printen en drogen als één processtap gezien.

### 8.4.2 Laminator en snij- en freesmachine

Deze processtappen worden samengenomen omdat de productiesequentie van deze processen verstrengeld zijn. De module gaat niet éénmalig naar beide machines in een

bepaalde volgorde maar wordt tussen de machines heen en weer gestuurd omdat beide processen meerdere keren voorkomen. In het geval van het bannerproces komt de module van de printer en droger en gaat dan naar de snij- en freesmachine (Zünd) om de lichtdruk op maat te snijden. Hiervoor waren de verschillende lichtsegmenten samen op de vijf substraat gedrukt. Deze verschillende segmenten moeten van elkaar gescheiden worden omdat ze op verschillende plaatsen in de grotere banner moeten komen. Lichtsegmenten worden bij het van elkaar scheiden ook ineens op de juiste maat gesneden. Daarna worden de modules een eerste keer gelamineerd om dan terug te gaan naar de snij- en freesmachine voor het frezen van de modules. Tenslotte worden de lampen nog twee maal gelamineerd, voor en achterkant. Voor deze twee processtappen is er geen *tooling*-duur. Er kan onmiddellijk overgegaan worden tot verwerking van de producten. Dit maakt de schaalbaarheid van de duur en bijgevolg de kosten eenvoudiger. De duur van deze productiestappen voor één banner is een standaard die gemakkelijk doorgetrokken kan worden naar procedures voor grotere projecten.

#### 8.4.3 Totale procesduur

Om een goed beeld te kunnen krijgen van de kosten en opbrengsten gegenereerd door de productie van de banners moet geweten zijn hoeveel projecten men kan doen per jaar. Ten eerste werd bekeken wat de procesduur is van een project. Het zou onrealistisch zijn om de individuele procestijden op de verschillende machines bij elkaar op te tellen want men kan verschillende machines eventueel tegelijkertijd opereren. Zeker bij grotere projecten is dit een reële optie. Door de vele uitzonderingen en verschillen tussen projecten kan voor die herziene totale procesduur moeilijk een eenduidige berekening gebruikt worden. Lumoza heeft uit praktijkervaring ondervonden dat de totale procesduur grotendeels afhankelijk is van de duur van de printer en de snij- en freesmachine. Als men deze twee processtappen individueel bekijkt en de langste processtap met een factor anderhalf vermenigvuldigd, wordt er een zeer goede benadering bekomen van de totale procesduur voor een project. Dit bleek in meerdere projecten een goede benadering en kan ook doorgetrokken worden naar de bannerprojecten.

Als de tijden van de bannerproductie bekeken worden, moet echter geconcludeerd worden dat de bezettingsgraad van de printer laag is. De grootste investering van de productielijn is slechts veertien procent van de totale potentiële productieduur

operationeel. Dit geeft aan dat er uitgekeken kan worden naar een oplossing om meer uit deze investering te halen. Voor het uitrekenen van het maximaal aantal projecten per jaar en de maximale bezetting wordt er gerekend met de totale projectduur. De assumptie wordt gemaakt dat er nooit twee projecten tegelijkertijd worden geproduceerd. De totale projectduur verlagen zorgt dus voor een groter aantal projecten die per jaar haalbaar zijn. Door een investering in een extra bottleneckmachine, namelijk een snijmachine, kan de potentiële productiehoeveelheid verdubbeld worden. De reden hiervoor is dat de andere twee productiestappen (printer met droger en laminator) niet half zo lang operationeel zijn als de snijmachine. De bezettingsgraden van de machines onder maximale bezetting met één snijmachine wordt in tabel 6 weergegeven. Het totaal aantal beschikbare uren is berekend op het aantal werkbare dagen per jaar, exclusief de feestdagen. (Federale Overheidsdienst Werkgelegenheid, Arbeid en Sociaal Overleg)

	Uren operationeel	Bezetting binnen productie-uren
<b>Printer</b>	316,8	0,16
<b>Laminator</b>	631,6	0,31
<b>Snijmachine</b>	1.354,4	0,67

**Tabel 6: Overzicht operationele uren per jaar en bezetting per machine**

Bij maximale bezetting moet de optie bekeken worden om een nieuwe snijmachine bij aan te kopen. De investeringsanalyse met betrekking tot een nieuwe snijmachine wordt in deze case ook uitgewerkt en afgewogen tegen het werken in twee shiften op één snijmachine.

De belangrijkste assumptie die gemaakt wordt bij de productie, is dat verschillende projecten niet tegelijk in productie zitten. Deze keuze is gemaakt omwille van de complexiteit in de productielijn. Producten bewegen enkele keren heen en weer tussen de snijmachine en de laminator. Door het gegeven dat Lumoza hoge *customization* aanbiedt, kan geen continue productie plaatsvinden op de verschillende machines. De productie kan dus wel verhoogd worden door de procesduur van de projecten te doen dalen.

In het begin start Lumoza aan een lage projectbezetting van vijftien procent. Maar door een steile leercurve wordt er voorzien elk jaar vijftien procent aan bezetting te winnen, zodat tegen jaar zeven de maximale jaarproductie kan bereikt worden met de huidige machines. De totale jaarlijkse marge op de productie gaat evenredig met de bezetting stijgen.



## 8.5 Inkomsten en uitgaven

De inkomsten die gegenereerd worden uit de verkochte eenheden van geproduceerde producten op de productielijn moeten in kaart gebracht worden. Deze inkomsten vormen de inkomende *cashflows* die opgenomen worden in de investeringsanalyse.

Voor de uitgaven moet er gekeken worden naar de variabele en vaste kosten. Er moet wel een onderscheid gemaakt worden tussen kosten en uitgaven. Uitgaven worden opgenomen in de investeringsanalyse, de kosten die niet tot de uitgaven behoren komen niet in de investeringsanalyse. Een voorbeeld zijn de afschrijvingen. Afschrijvingen kunnen wel een belastingvoordeel opleveren bij winstgevende bedrijven en worden onrechtstreeks wel opgenomen in de investeringsanalyse onder het belastingschild. De logica hierachter is dat de verlaging van de winst door de afschrijvingskosten de belastingen op winst doen afnemen.

### 8.5.1 Inkomsten

Voor de verschillende banners zijn er vaste verkoopprijzen. Aangezien de grootte van de banners telkens een veelvoud is van de 16segment banner, zijn de verkoopprijzen ook telkens een veelvoud. De verkoopprijzen werden reeds meegegeven in tabel 4.

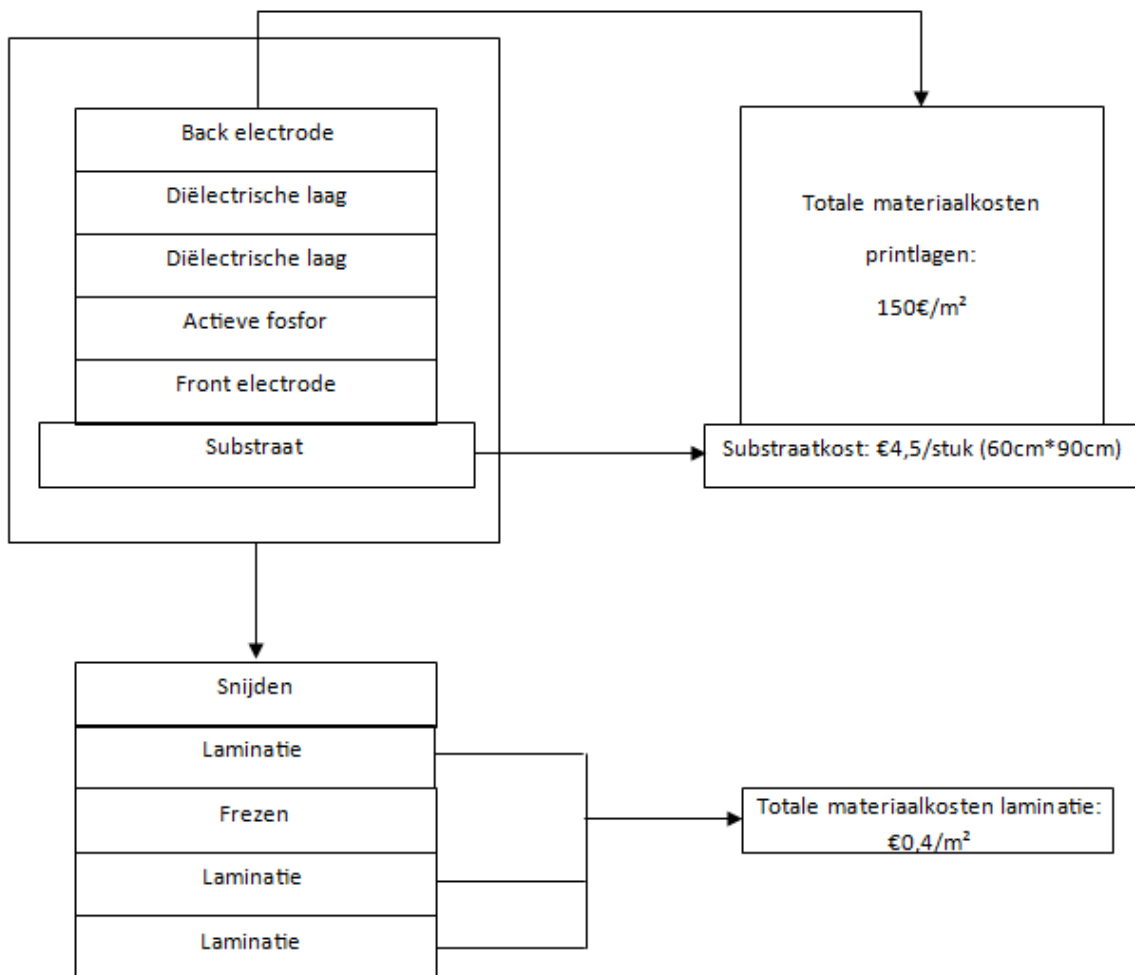
Er wordt een combinatie gemaakt van projecten van verschillende maten om de jaarproductie en de bijhorende omzet in te schatten. Deze combinatie is echter een ruwe schatting want de voorkeur van de vraag voor de verschillende banners kan tot op heden niet ingeschat worden.

### 8.5.2 Uitgaven

Na de inkomsten worden de uitgaven bekeken. Deze worden opgesplitst in variabele kosten en vaste kosten. Onder de variabele kosten vallen de materiaalkosten, de loonkosten en de andere operationele kosten. Onder de vaste kosten vallen de huurkosten van het pand en de leasingkosten.

### 8.5.2.1 Variabele kosten

De loonkosten worden als variabel gezien omdat deze afhangen van het aantal projecten die worden aangenomen en dus samenhangen met het aantal machine-uren. Dit wordt mogelijk gemaakt door te werken met interim-arbeiders die in de productie ingeschakeld kunnen worden. De loonkost bedraagt voor de interim-arbeiders vijftientig euro per uur. De materiaalkosten worden in onderstaande figuur 24 weergegeven.



**Figuur 24: Overzicht materiaalkosten en productiestappen.**

De materiaalkosten van de verschillende printlagen lopen op tot honderdvijftig euro per vierkante meter. Dit is makkelijk te incorporeren in de totale kost van de banners

aangezien per zestien segmenten juist één vierkante meter lichtdruk is. In kleine projecten moet er rekening gehouden worden met één vierkante meter inktverlies door uitval. Bij projecten met meerdere banners wordt er rekening gehouden met tien procent uitval in het totaal. Het tien procent-principe geldt vanaf het moment dat tien procent uitval de vierkante meter overstijgt. De kosten van de substraten waarop de lichtdruk geprint wordt, bedragen vier en halve euro per stuk. Per zestien segmenten worden vijf panelen gebruikt zoals reeds aangehaald bij de processen. De kosten per laminatielaag bedragen veertig cent per vierkante meter. Door groot verlies aan materiaal lopen deze kosten wel op. De producten worden ook langs twee kanten gelamineerd.

De operationele kosten zijn de energiekosten. Aangezien de machines allemaal op elektriciteit werken is er maar een energievorm die bekeken moet worden. Voor de verschillende machines worden deze kosten apart bekeken. Per machine-uur is de printer de machine die het meest verbruikt, maar omdat de snijmachine ongeveer drie maal zo lang operationeel is per project, komt de operationele kost per project wel in de buurt van die van de printer. De elektriciteitskosten worden in onderstaande tabel 7 weergegeven.

	Operationele kosten/uur
Printer	€85
Laminator	€2,5
Snijmachine	€26,5

**Tabel 7: Operationele kosten**

De loonkosten worden gebaseerd op de duur dat elke arbeider werkt op de machines en op de operationele en manuele taken die daarbuiten nog uitgevoerd moeten worden. Een voorbeeld van een dergelijke taak is dat de stukken lichtdruk op de grote banner bevestigd moeten worden. De grote banner, zijnde een groot paneel met grafische druk, wordt extern aangekocht. Een andere taak is de uitvoering van de *tooling* op de printer. Omdat de loonkost onmogelijk kan losgekoppeld worden van de projecten, wordt het als een variabele kost bekeken.

In tabel 8 wordt weergegeven hoelang de arbeiders en de designer aan een project werken van één banner van een bepaalde grootte.

	Werkuren arbeiders	Werkuren artwork	Loonkost artwork	loonkost arbeid
16 segmenten	14,5	7,75	€387,5	€361,3
32 segmenten	24,8	7,75	€387,5	€620,0
48 segmenten	35,5	15,5	€775,0	€886,3
64 segmenten	46,1	15,5	€775,0	€1152,5

**Tabel 8: Loonkosten**

Momenteel worden de projecten afgewerkt door twee arbeidskrachten die vijftientig euro per uur verdienen. Onmiddellijk kan geconcludeerd worden dat er op dit moment langer gewerkt wordt aan de projecten dan dat er eerder werd aangegeven bij de totale procesduur. Door meerdere arbeidskrachten in te zetten wordt dit probleem opgelost. Lumoza werkt met interim werkkrachten, die voor bepaalde duur kunnen ingezet worden wanneer nodig. Op dit moment wordt slechts een bezetting van vijftien procent behaald dus is het geen probleem dat de productieduur verlengd wordt door de in dit geval limiterende factor voor de duur, namelijk de arbeidscapaciteit.

Het ontwerp van de lichtdruk wordt gedaan door Wouter Moons, maar hij heeft ook andere verplichtingen. Het aandeel van zijn tijd dat besteed wordt aan het ontwerp voor de projecten wordt ook toegevoegd aan de loonkost. Voor het design wordt een uurloon van vijftig euro aangerekend. Ook dit valt onder de variabele kosten omwille van de afhankelijkheid van het aantal projecten en aantal keren *tooling*, want die vereisen telkens een nieuw ontwerp.

Onder de *tooling*kosten van de printer zijn de kosten van aankoop van de zeef ondergebracht. Gedurende de *tooling* worden ook operationele kosten gemaakt, maar deze zijn reeds ondergebracht onder de verschillende andere kostenposten. De kost van de zeven worden in tabel 9 weergegeven.

Project	Aantal keren <i>tooling</i>	<i>Tooling</i> kost
16 segmenten	1	€300
32 segmenten	2	€600
48 segmenten	3	€900
64 segmenten	4	€1.200

**Tabel 9: Tooling**

Ten slotte moeten de verschillende lichtdelen bevestigd worden op de banner. De banner zelf, met digitale print, wordt extern aangekocht. De prijzen van de banners staan in tabel 10.

	Aankoopkost extern bedrukte banner
16 segmenten	€327,5
32 segmenten	€655,0
48 segmenten	€982,5
64 segmenten	€1.310,0

**Tabel 10: Kost extern aangekochte banner**

#### 8.5.2.2 Vaste kosten

Onder de vaste kosten kunnen in deze case de huurkosten en de leasingkosten van de printer en droger ondergebracht worden. Om de productielijn te kunnen plaatsen moet er een productiehal voorzien worden. De maandelijkse huurkost voor de productiehal met kantoren gelegen in Genk bedraagt drieduizend euro.

De maandelijkse betalingen voor de leasing van de printer en de droger bestaan uit de leasingkost en intrest van drie procent. In onderstaande tabel 11 worden de maandelijkse vaste kosten weergegeven.

	Vaste kosten
Huur	€3.000
Leasing	€5.043

**Tabel 11: Vaste kosten**

Elk jaar wordt ook een marketingbudget opgesteld dat zes procent van de omzet zal omvatten. De kosten worden als vaste kosten aanzien omdat ze niet inherent worden aanzien als kost van de productie. Het marketingbudget wordt daarna wel gekoppeld aan de grote van de afzet die gerealiseerd wordt. Er wordt ook gerekend met de prognose voor dat jaar om het budget op te stellen, niet de verkoopcijfers van het jaar ervoor. Op die manier kunnen verkoopdoelstellingen gestuurd worden aan de hand van marketinguitgaven.

De loonkosten die samenhangen met de productie, zoals loonkost voor artwork en de arbeiders, zijn reeds opgenomen in de berekening van de marge. De verkoper, die voltijds actief is en een Chief Operations Officer (COO) die wordt aangetrokken voor de nieuwe productielijn, moeten ook nog opgenomen worden in de analyse. Deze lonen worden aanzien als vast, samen met de commissies die opgetrokken kunnen worden. De commissies bedragen in totaal zes procent van de verkoop. Het vaste loon bedraagt drieduizend voor de verkoper en vijfduizend voor de COO.

### 8.5.3 De discontovoet

De discontovoet kan bepaald worden aan de hand van de nominale rente en de interest. (AZZOPARDI., B., EMMOTT, C.J.M., URBINA, A., KREBS, F.C., et al., 2011) Aangezien de nominale rente laag staat ten gevolge van de crisis, zal de discontovoet ook laag zijn. Lumoza is ook actief in een innovatieve markt waarbij constante ontwikkeling plaatsvindt. Hiermee gaat een bepaalde onzekerheid gepaard. Machines die vandaag optimaal zijn, kunnen in de toekomst suboptimaal zijn door ontwikkelingen in de industrie. Daarom is de keuze gevallen op een hogere discontovoet om de investering kritisch te beoordelen. Hierbij worden de *cashflows* in de eerste jaren dus veel hoger in waarde ingeschat dan de *cashflows* in de latere jaren omwille van de sectorale onzekerheid.

Omdat de huur- en leasingkosten maandelijks worden betaald, is er gekozen voor een maandelijks verdiscontering. Voor de weergave van de *cashflow*tabel wordt er wel nog steeds gewerkt met jaarlijkse *cashflows* maar achter de verdiscontering zit de maandelijks berekening. De jaarlijkse discontovoet moet naar de maandelijks discontovoet omgezet worden volgens de formule:  $r_m = r_j^{1/12}$ .  $R_m$  staat voor de maandelijks rentevoet en die wordt bekomen door de jaarlijkse rentevoet tot de macht één twaalfde te doen. De totale marges, bekomen door de verkoopprijzen van de banners te verminderen met de variabele kosten, worden ook maandelijks verdisconteerd. De jaarlijkse marges worden gelijk verdeeld over de twaalf maanden. De laatste *cashflow* die nog niet besproken is voor de verdiscontering is de aankoopoptie van de printer en droger. Die wordt verdisconteerd in de negenenveertigste maand, de maand dat de optie van financiële leasing gelicht wordt.

### 8.5.4 Vennootschapsbelasting

De vennootschapsbelasting wordt voor de verdiscontering berekend en van de netto *cashflow* afgetrokken. Het belastingpercentage dat gehanteerd wordt, bedraagt 33,99. (Portaal België)

Om het belastingvoordeel van de afschrijvingen mee te nemen in de analyse, wordt het belastingschild van de afschrijvingen berekend. De afschrijvingen worden niet opgenomen in de *cashflow*tabel omdat dit geen uitgave is. In de resultatenrekening staan

de afschrijvingen echter wel. Het belastingschild is bijgevolg een vermindering van de te betalen vennootschapsbelasting voortvloeiend uit de extra kost van de afschrijvingen in de resultatenrekening. De machines worden afgeschreven op een periode van vier jaar. Een overzicht kan teruggevonden worden in tabel 12.

Machines	Aankoopprijs	Restwaarde	Afschrijving/jaar
Printer en droger	€ 223.750,00	€ 2.237,50	€ 55.378,13
Snijmachine	€ 85.000,00	€ 0,00	€ 21.250,00
Laminator	€ 5.000,00	€ 0,00	€ 1.250,00
		<b>Totaal</b>	€ 77.878,13
<b>Belastingstarief</b>	33,99%		

**Tabel 12: Afschrijvingen en belastingstarief**

Voor de vennootschapsbelasting worden de andere bedrijfskosten geraamd over tien jaar om te kijken in welke periodes winst gemaakt wordt. Een expansief beleid inzake marketingkosten en R&D kosten over de jaren worden geïntegreerd in deze berekeningen. Een gezonde KMO zet zijn marketinguitgaven tussen de twee en de tien procent van de omzet. (SCOTT, 2013) In deze casestudie wordt een percentage van vijf procent gehanteerd van de omzet om de marketingkosten te dekken. Voor de kosten gemaakt uit onderzoek en ontwikkeling wordt een jaarlijks groeipercentage van vijf procent genomen.

## 8.6 De netto contante waarde van de productielijn

Eerst wordt er onderzocht of de investering in een productielijn voor het printen van elektroluminescentie een economisch rendabele keuze is voor de afzetmarkt die Lumoza beoogt. De investeringskost bestaat uit de som van de aankooprijzen van de laminator en de snijmachine. De leasingskost van de printer en droger wordt verrekend in de *cashflows*. Na jaar vier wordt er gekozen om de aankoopoptie te lichten.

### 8.6.1 *Cashflow*-tabel

Om een goed overzicht van de investering te verkrijgen, wordt een tabel opgesteld met de in- en uitgaande geldstromen, gerelateerd aan het investeringsproject. Deze wordt weergegeven in tabel 13. De belangrijke assumpties die gemaakt zijn voor het tot stand komen van het NCW-model staan in een overzichtelijke tabel samengevat in bijlage 11.1.

De *cashflow* is opgesteld voor tien jaar. Het potentieel van deze investering kan verder reiken, maar op een tijdshorizon van tien jaar kan reeds een goed beeld gevormd worden om de investeringsbeslissing te staven.

Eerst worden de jaarmarges opgenomen in de analyse. Deze nemen toe tot in jaar zeven, waarbij een bezetting van honderd procent wordt behaald. De vaste maandelijkse uitgaande kasstromen worden dan opgenomen in de tabel, namelijk de huur van de productiehhal met kantoren en de leasingkosten van de printer en de droger. De leasingskosten lopen tot en met jaar vier.

De vaste loonkost met commissies en marketingkosten stijgen elk jaar mee met de verkoopcijfers. De laatste stijging vindt plaats in jaar zeven omdat daar de maximale bezetting bereikt wordt. Men kan hierna met deze opstelling van machines niet meer produceren en bijgevolg niet meer verkopen dan de verkoop in jaar zeven.

De investeringskosten worden in jaar nul weergegeven. Dit zijn de investeringen in een snij- en freesmachine en een laminator. De aankoopoptie op de printer en droger wordt weergegeven in jaar vijf.

Voor de verdiscontering worden de vennootschapsbelastingen per jaar weergegeven. Ook de correctie in de vennootschapsbelasting door het belastingschild van de afschrijvingen wordt apart aangehaald. Het belastingschild kan echter nooit hoger zijn dan de vennootschapsbelasting. Van het moment dat de correctie door de afschrijvingen even hoog is als de vennootschapsbelasting wordt er verlies gemaakt in dat jaar. Op verlies wordt geen vennootschapsbelasting betaald, dus het belastingschild kan niet verder oplopen. De eerste vier jaar worden geen vennootschapsbelastingen betaald omdat niet verwacht wordt dat winst gemaakt wordt in die jaren.

De jaarlijkse *cashflows* na belastingen worden dan verdisconteerd naar de waarde dat die toekomstige *cashflow* op het moment van investering heeft. Door een rendement voorop te stellen van twaalf procent gaan de *cashflows* gevoelig zijn aan de tijdswaarde van



geld. De verdisconteerde *cashflows* per jaar zijn de som van de maandelijks verdisconteerde *cashflows* binnen dat jaar.

Enkel in jaar één kan een negatieve *cashflow* geconstateerd worden. De belangrijkste oorzaak hiervan is de lage bezetting en bijgevolg de lage jaarmarge die behaald wordt. In het eerste jaar wordt dus leergeld betaald, maar door een steile leercurve is dit slechts een éénmalig deficiet. In het volgende jaar wordt dit al omgezet in een positieve *cashflow*.

De netto contante waarde geeft aan dat de investering zeer interessant is. De waarde van de investering bedraagt bijna anderhalf miljoen op tien jaar op het moment van investering. De *internal rate of return* geeft aan dat het rendement op de investering op honderdachtien procent ligt. De interne rendementsvoet bedraagt veel meer dan het vereiste rendement van twaalf procent dat vooropgesteld werd in de analyse.

Er kan dus geconcludeerd worden dat de investering in een productielijn gericht op het produceren van elektroluminescente banners een goede investeringsoptie is voor Lumoza.

Jaar	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Marge banners</b>		€ 111.243,68	€ 222.487,36	€ 333.731,04	€ 444.974,72	€ 556.218,39	€ 667.462,07	€ 741.624,53	€ 741.624,53	€ 741.624,53	€ 741.624,53
<b>Huurkosten</b>		-€ 36.000,00	-€ 36.000,00	-€ 36.000,00	-€ 36.000,00	-€ 36.000,00	-€ 36.000,00	-€ 36.000,00	-€ 36.000,00	-€ 36.000,00	-€ 36.000,00
<b>Aflossing lease Thieme</b>		-€ 60.519,24	-€ 60.519,24	-€ 60.519,24	-€ 60.519,24						
<b>Aankoopoptie Thieme</b>						-€ 2.237,50					
<b>Loonkost en Commissies</b>		-€ 20.190,50	-€ 32.381,00	-€ 44.571,50	-€ 56.762,00	-€ 68.952,50	-€ 81.143,00	-€ 89.270,00	-€ 89.270,00	-€ 89.270,00	-€ 89.270,00
<b>Marketingkosten</b>		-€ 12.190,50	-€ 24.381,00	-€ 36.571,50	-€ 48.762,00	-€ 60.952,50	-€ 73.143,00	-€ 81.270,00	-€ 81.270,00	-€ 81.270,00	-€ 81.270,00
<b>Aankoop Seal</b>	-€ 5.000,00										
<b>Aankoop Zund</b>	-€ 85.000,00										
<b>Vennootschapsbelasting</b>		€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	-€ 34.407,11	-€ 59.800,22	-€ 133.111,77	-€ 70.590,24	-€ 65.807,51	-€ 60.785,64
<b>Belastingsschild afschrijvingen</b>		€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00						
<b>Verdisconteerde CF (maandbasis)</b>	-€ 90.000,00	-€ 16.614,11	€ 58.143,00	€ 117.071,46	€ 162.704,94	€ 212.474,07	€ 224.479,95	€ 194.872,19	€ 199.244,43	€ 179.621,51	€ 161.993,26
<b>NCW</b>	€ 1.403.990,71										

**Tabel 13: Netto contante waarde van het investeringsproject**

## 8.6.2 Monte-Carlo analyse

Om de accuraatheid en de gevoeligheid van de investeringsanalyse te onderzoeken wordt een Monte-Carlo analyse uitgevoerd. Door variabelen een probabiliteitsverdeling toe te kennen worden deze variabelen niet als vast aanschouwd maar kunnen deze variëren over een bepaalde range. Tienduizend runs worden uitgevoerd om vele combinaties tussen de variërende variabelen op te nemen in het model. Elke combinatie tussen de variabelen resulteert in een bijbehorende NCW. De tienduizend gegenereerde NCW's worden dan weergegeven in een verdeling.

### 8.6.2.1 Keuze variabelen

De doelvariabele is de NCW. Het doel van deze analyse is namelijk te onderzoeken welke variabelen een sterke invloed hebben op de NCW. Belangrijk is ook te onderzoeken onder welke omstandigheden de investering niet meer interessant is.

De variabelen opgenomen in de sensitiviteitsanalyse worden hieronder toegelicht.

**De prijs van de inkt:** De markt voor *printable electronics* en meer specifiek elektroluminescentie gaat sterk toenemen. (GASMAN, 2008) (IDTECHEX, 2007) De prijs voor ITO en metaalelektroden zouden gestabiliseerd zijn. De meeste inkten zitten nog in de ontwikkelingsfase of in de groeifase. De inkten voor elektroluminescentie voor *screen printing* staan redelijk goed op punt. Doordat de markt echter vergroot, kan dat tot gevolg hebben dat de prijs zakt omdat de producent van de inkten de prijs kan drukken. De kosten uit onderzoek en ontwikkeling zouden dan minder doorwegen. De keuze is gemaakt om te werken met een triangulaire verdeling, waarbij de gehanteerde prijs tot hiertoe (150euro/m<sup>2</sup>) geldt als maximumprijs. De minimumprijs bedraagt 120euro.

**De uitval:** Door opstart en productieonregelmatigheden wordt gerekend op een uitval van tien procent. Een leercurve kan zorgen voor een verbetering van de uitval en een daling van de kosten. Het maximum wordt verondersteld tien procent te zijn en het zou kunnen dalen tot vijf procent. De keuze viel op een eenzijdig triangulaire verdeling.

**Aantal projecten per bannergrootte:** In een bepaalde bezetting kunnen van elk type banner een maximaal aantal banners geproduceerd worden voordat de bezetting bereikt is. Het is echter wel van belang in hoeveel projecten dit aantal bereikt wordt. De *tooling*

hangt namelijk samen met het aantal projecten. Het is bijvoorbeeld goedkoper om acht dezelfde banners te maken, dan acht verschillende. De *tooling* moet bij acht dezelfde banners slechts één maal gebeuren (bij de 16segment banner), bij acht verschillende banners is dat acht maal. De keuze werd gemaakt voor een triangulaire verdeling te nemen met daarbij de waarden van het NCW-model als meest waarschijnlijke waarden. Het maximum werd gesteld op het maximaal aantal banners dat kan geproduceerd worden van elke grootte. De uitwijking naar het minimum aantal projecten is gebaseerd op een gelijke afwijking van de meest waarschijnlijke waarde tot het maximum. Ook hier werd gekozen voor een triangulaire verdeling van de parameter.

**De jaarlijkse groei in bezetting:** In het NCW-model wordt verondersteld dat de bezetting elk jaar groeit met een percentage van vijftien procent. Deze groei is gebaseerd op een leercurve in de productie en de marktgroei. Om na te gaan wat de weerslag op de NCW is als deze groei niet behaald wordt, is het maximum van de verdeling van deze variabele op vijftien procent gehouden en kan deze afwijken naar beneden tot nul. Het meest waarschijnlijke blijft wel dat de jaarlijkse groei in bezetting vijftien procent is. Dit is een eenzijdige triangulaire verdeling tussen 15 en 0 procent. 15 procent blijft namelijk het meest waarschijnlijk.

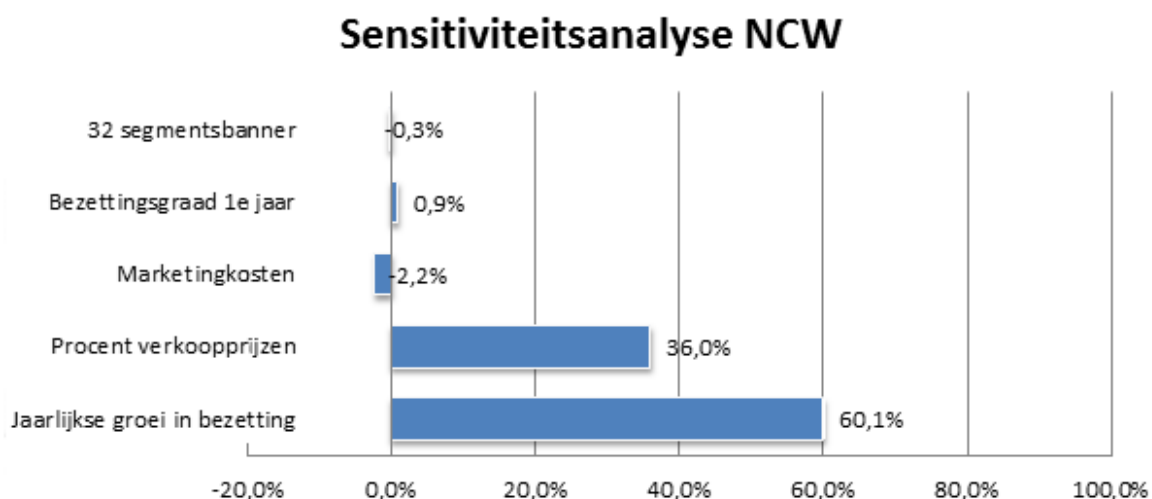
**Bezettingsgraad in jaar 1:** De startbezetting in het eerste jaar werd geschat op vijftien procent. Ook hier wordt afgetast wat de gevolgen zijn van een lagere waarde. Hiervoor werd gekozen om een uniforme verdeling toe te wijzen met als range tien tot vijftien procent. Voor de productie van start ging, kon het namelijk minder goed ingeschat worden en werd een bezetting van tien à vijftien procent ingeschat. Dit dus een uniforme verdeling waarbij de kans even groot is voor alle percentages tussen 10 en 15 procent om gekozen te worden.

**Marketingkosten:** De marketingkosten worden berekend aan de hand van de omzet van dat jaar. Zes procent van de omzet wordt uitgetrokken voor het marketingbudget om de verkopen te stimuleren. De richtlijnen omtrent marketingbudgetten geven een range aan tussen de twee en tien procent. Een triangulaire verdeling werd hiervoor gebruikt waarbij zes procent nog steeds de meest waarschijnlijke waarde is.

**Lonen en commissies:** Het deel commissies is ook gelinkt aan de verkopen. In het NCW-model wordt gesteld dat commissies kunnen oplopen tot in het totaal zes procent van de verkopen. Hiervoor werd een triangulaire verdeling opgesteld met een afwijking van één procent in beide richtingen en met zes procent als hoogst waarschijnlijke variabele.

**Procent van verkoopprijzen:** De inkomsten zouden kunnen lijden onder de toenemende concurrentie van andere producenten en andere technologieën zoals bijvoorbeeld OLED. Omwille van de groeiende concurrentie zou het kunnen zijn dat de prijzen van Lumoza competitiever moeten worden. Het procent van de verkoopprijs geeft aan hoeveel procent van de initiële verkoopprijzen gevraagd zullen worden door Lumoza aan de klant. Dus hoe hoger het procent van de verkoopprijzen, hoe hoger de inkomsten en de NCW. Hier werd gekozen voor een triangulaire verdeling waarbij 100 procent zowel de meest waarschijnlijke waarde is als het maximum. Het minimum bedraagt 70 procent van de verkoopprijzen.

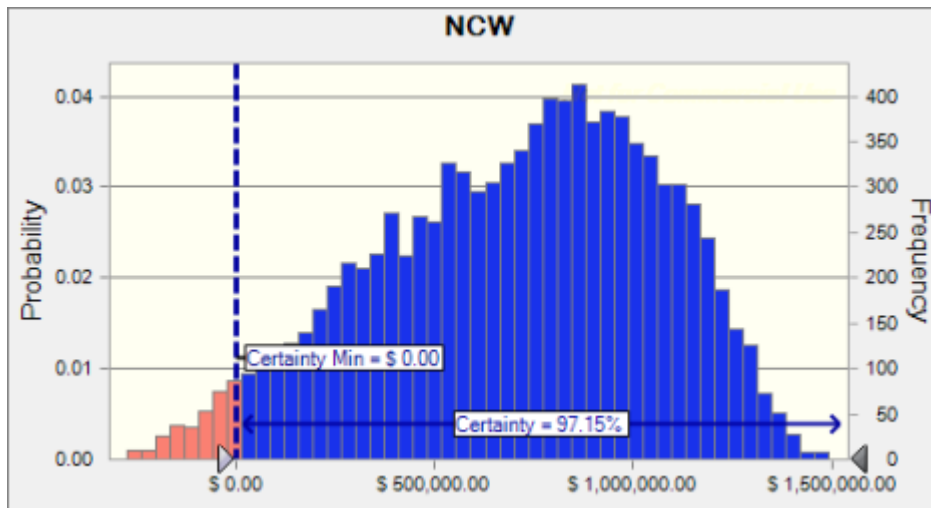
In figuur 25 staat welke variabelen een grote invloed uitoefenen op de NCW. De groei in de bezetting is in dit geval de grote kracht achter veranderingen in de netto contante waarde. De groei in bezetting moet dus zeker goed in het oog worden gehouden. Ook de prijzen zouden op niveau gehouden moeten worden want de hoogte van de verkoopprijzen is de tweede hoogste factor in het model. Daarnaast hebben enkel de marketingkosten en bezettingsgraad in jaar één nog een groter percentage dan één procent. De invloed van andere variabelen kan dus verwaarloosd worden. De groei in bezetting, het procent van de verkoopprijzen en de bezetting in jaar één zijn positief omdat deze positief gecorreleerd zijn met de netto contante waarde. De andere variabelen zijn negatief gecorreleerd. De invloed van de variabelen, die niet opgenomen zijn in figuur 25, zijn verwaarloosbaar klein.



**Figuur 25: Het percentage per variabele dat de variatie in de NCW verklaart**

### 8.6.2.2 Verdeling NCW

In figuur 26 wordt de verdeling van de resulterende NCW's weergegeven. De waarden van de NCW bij deze input blijven voor meer dan zevenennegentig procent positief. Hieruit kan de conclusie getrokken worden dat het risico beperkt blijft bij deze ranges voor de variabelen.



**Figuur 26: Verdeling NCW**

Het resultaat is een lichte linksscheve verdeling. Dat is voornamelijk het resultaat van een eenzijdige, triangulaire verdeling voor de jaarlijkse groei in bezetting. De range ligt tussen nul en vijftien, maar vijftien is het meest waarschijnlijk. In figuur 18 werd reeds geconstateerd dat de groei in bezetting de meest bepalende variabele is. Dus meer runs met hoge bezettingsgroei betekenen ook meer runs met een hoge NCW. Runs met een lage groei in bezetting, in combinatie met een laag procent van de verkoopprijzen zorgen voornamelijk voor de uitschieters met lage NCW.

### 8.6.2.3 Grenzen invloedrijke variabele

Bij de Monte-Carlo analyse is vastgesteld dat de groei in bezetting en de verkoopprijzen twee bepalende variabelen zijn van het succes of de grootte van het succes van de investering. Het doel van deze analyse is na te gaan wat de ondergrenzen zijn van deze variabelen voor het bereiken van een netto contante waarde van nul.

Eerst wordt de mate waarin de bezetting jaarlijks moet toenemen onderzocht. De bezettingsgraad in jaar één in het basismodel is vijftien procent. Als alle andere variabelen ook constant blijven, moet de bezettingsgraad jaarlijks met minder dan 0,1 procent toenemen. De startbezetting aanhouden is bijgevolg net niet voldoende om een positieve NCW te behalen. Aangezien de startbezetting slechts vijftien procent bedraagt, lijkt deze relatief lage vereiste een haalbare doelstelling.

Ook de verkoopprijzen worden apart belicht. Hierbij is onderzocht, welke algemene procentuele prijsdaling moet plaatsvinden om een NCW in break-even positie te verkrijgen. Elke verkoopprijs zou in dat geval nog ongeveer vierenzestig procent van de initiële verkoopprijzen. Dit zou een algemene prijsdaling van zesendertig procent betekenen. De verkoopprijzen zouden boven deze limiet moeten blijven.

Om een idee te hebben wat de kritische verkoopprijzen zijn bij verschillende niveaus van groei in bezettingsgraad, zijn enkele ijkpunten uitgezet in tabel 14.

Groei in bezettingsgraad	0%	5%	10%	15%
<b>Kritische Verkoopprijzen (%)</b>	102,81%	74,83%	66,66%	63,88%
<b>16 segment</b>	€ 3.598,29	€ 2.619,10	€ 2.333,22	€ 2.235,78
<b>32 segment</b>	€ 7.196,58	€ 5.238,20	€ 4.666,44	€ 4.471,56
<b>48 segment</b>	€ 10.794,87	€ 7.857,29	€ 6.999,66	€ 6.707,35
<b>64 segment</b>	€ 14.393,16	€ 10.476,39	€ 9.332,88	€ 8.943,13

**Tabel 14: Kritische verkoopprijzen bij verschillende groeipercentages voor de bezettingsgraad**

Het tekort dat op de NCW bestaat bij een groei in bezettingsgraad van nul, kan dus wel opgelost worden door de verkoopprijzen met ongeveer drie procent of meer op te trekken. Dit impliceert dus wel dat dit geen weerslag mag hebben op die verkopen. De bezetting in jaar één van vijftien procent moet wel behouden blijven.

## 8.7 De netto contante waarde van een extra snijmachine

Bij een analyse van de bezetting blijkt dat de printer en droger een lage bezettingsgraad tijdens projecten hebben van ongeveer vijftien procent. Om dit percentage omhoog te krijgen moet de bottleneck ontlast worden. De bottleneck in de huidige machineopstelling is de snijmachine. Door een extra snijmachine aan te kopen kan de productie op de snijmachines verdeeld worden en kan de duur van de processtap tot de helft teruggebracht worden. Op deze manier kan de bezettingsgraad op de printer vergroten.

De investering wordt op een kortere periode van vier jaar beoordeeld. De keuze om slechts vier jaar in acht te nemen is dat de investering bij de start van jaar zeven beoordeeld wordt. Na vier jaar zit men dan in jaar tien van de oorspronkelijke investering. Op deze manier wordt de tijdshorizon van de eerste investeringsanalyse niet overschreden.

### 8.7.1 Opstellen scenario's

Om de impact te kunnen inschatten van een extra machine op de productiegrootte moet de vraag ingeschat worden. Met andere woorden, met hoeveel gaat de productie daadwerkelijk kunnen stijgen bij de verdubbeling van de potentiële productiegrootte? De honderdprocent bezetting van de eerste netto contante waarde wordt nu een vijftig procent bezetting. Omdat de grootte van de extra vraag in die jaren moeilijk te voorspellen is, worden drie mogelijke scenario's uitgewerkt. De *worst case* reflecteert een scenario waarbij er gestart wordt zonder extra productie in het eerste jaar na de investering. Volgens de nieuwe bezetting start de bezetting dus op vijftig procent. De jaarlijkse bezettingsgroei bedraagt twee komma vijf procent. In de *average* en *best case* wordt er gestart met een extra productie van twee komma vijf procent en een jaarlijkse stijging van respectievelijk vijf en zeven komma vijf procent. In tabel 15 staat een overzicht weergegeven van de kerngetallen met de bijbehorende jaarmarges ten gevolge van de extra productie ten gevolge van de investering.

Case	Bezetting		Jaarmarges			
	Extra jaar 1	Stijging bezetting	1	2	3	4
<b>Worst</b>	0%	2,5%	€0	€37081,23	€74162,45	€111243,7
<b>Average</b>	2,5%	5%	€37081,23	€111243,7	€185406,1	€259568,6
<b>Best</b>	2,5%	7,5%	€37081,23	€148324,9	€259568,6	€370812,3

**Tabel 15: Scenario's, extra bezetting en jaarmarges**

Om de waarschijnlijkheid van de scenario's aan te geven worden gewichten toegewezen. De verdeling is als volgt: de *average case* vijftig procent en de andere twee cases elk vijfentwintig procent. Na de *cashflow*analyse wordt gekeken wat het gewogen gemiddelde van de netto contante waarde is.



### 8.7.2 NCW: Average case

De *average case* is het scenario dat vooropgesteld wordt als het meest waarschijnlijke en gemiddelde scenario. De vraag gaat minder snel stijgen dan in de beginjaren. Door de herziende bezettingsgraad van vijftig procent, heeft een stijging van vijf procent in de bezettingsgraad een even grote impact als een stijging van tien procent in de investeringsanalyse van de volledige productielijn. De bezetting bedraagt in jaar tien uiteindelijk zevenenzestig komma vijf procent. De *cashflow*-tabel met netto contante waarde wordt weergegeven in tabel 16.

<b>Average case</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Marge banners</b>		€ 37.081,23	€ 111.243,68	€ 185.406,13	€ 259.568,58
<b>Marketing</b>		-€ 3.386,25	-€ 10.158,75	-€ 16.931,25	-€ 23.703,75
<b>Commissie</b>		-€ 3.386,25	-€ 10.158,75	-€ 16.931,25	-€ 23.703,75
<b>Aankoop Zund</b>	-€ 85.000,00				
<b>Vennootschapsbelasting</b>		-€ 10.301,94	-€ 30.905,81	-€ 51.509,68	-€ 72.113,55
<b>Belastingplicht afschrijvingen</b>		€ 7.222,88	€ 7.222,88	€ 7.222,88	€ 7.222,88
<b>Verdisconteerde CF (maandbasis)</b>	-€ 85.000,00	€ 25.770,13	€ 57.511,06	€ 82.154,54	€ 100.857,07
<b>NCW</b>	€ 181.292,80				

**Tabel 16 Netto contante waarde van de average case**

Enkel de *cashflows* gerelateerd aan de extra gerealiseerde productie worden opgenomen. Ten eerste zijn dat de marges gerealiseerd uit de stijging in de productie, dankzij de extra snijmachine. De huurkosten verbonden aan het huren van een productiehal vallen weg want er is voldoende ruimte om de machine te zetten in de huidige productiehal. Ook leasekosten zijn niet van toepassing, aangezien de snijmachine van het merk Zünd wordt aangekocht en wordt weergegeven als de investeringskost in jaar nul. Bij de stijging in de verkoop horen wel nog steeds een verhoogd marketingbudget en commissielonen omdat deze zijn teruggekoppeld aan de verkoopcijfers.

Voor de vennootschapsbelasting kan ondertussen de veronderstelling gemaakt worden dat de onderneming winstgevend is. Dit wil zeggen dat zowel de vennootschapsbelasting, als het belastingschild op de afschrijving van de snijmachine volledig mag aangerekend worden. Het belastingschild kan vanaf nu ook de vennootschapsbelasting overschrijden, maar dit is in dit scenario niet het geval.

In dit scenario is het resultaat positief met een netto contante waarde van ongeveer honderdtachtigduizend euro. De interne rendementsvoet bedraagt ongeveer vijftien procent.

### 8.7.3 NCW: *Worst case*

De onderdelen van de *cashflow*tabel gaan gelijkaardig zijn aan die van de *average case*. Alles is wel direct of indirect gelinkt aan de verkopen, dus gaan de waarden allemaal verschillen. In tabel 17 staat de *cashflow*analyse voor de *worst case*.

<b>Worst case</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Marge banners</b>		€ 0,00	€ 37.081,23	€ 74.162,45	€ 111.243,68
<b>Marketing</b>		€ 0,00	-€ 3.386,25	-€ 6.772,50	-€ 10.158,75
<b>Commissie</b>		€ 0,00	-€ 3.386,25	-€ 6.772,50	-€ 10.158,75
<b>Aankoop Zünd</b>	-€ 85.000,00				
<b>Vennootschaps-belasting</b>		€ 0,00	-€ 10.301,94	-€ 20.603,87	-€ 30.905,81
<b>Belastingsschild afschrijvingen</b>		€ 7.222,88	€ 7.222,88	€ 7.222,88	€ 7.222,88
<b>Verdisconteerde CF (maandbasis)</b>	-€ 85.000,00	€ 6.449,00	€ 23.009,04	€ 35.946,48	€ 45.847,47
<b>NCW</b>	€ 26.251,98				

**Tabel 17: Netto contante waarde van de *worst case***

In jaar één is de extra machine nog niet noodzakelijk geweest omdat de verwachte groei in de vraag niet heeft plaatsgevonden. In dat eerste jaar ontstaat er enkel een belastingvoordeel door de afschrijving van de snijmachine. Op die manier is de *cashflow* alsnog positief. Vanaf het tweede jaar is de productie wel toegenomen en nemen de positieve *cashflows* toe.

Ook in de *worst case* is de netto contante waarde positief. Dit is dus nog steeds een goed resultaat. Het intern rendement bedraagt hier twintig procent.

#### 8.7.4 NCW: *Best case*

In tabel 18 wordt de meeste optimistische inschatting van het model gemaakt. De bezetting stijgt in dezelfde mate als de eerste zes jaar.

<i>Best case</i>	0	1	2	3	4
<b>Marge banners</b>		€ 37.081,23	€ 148.324,91	€ 259.568,58	€ 370.812,26
<b>Marketing</b>		-€ 3.386,25	-€ 13.545,00	-€ 23.703,75	-€ 33.862,50
<b>Commissie</b>		-€ 3.386,25	-€ 13.545,00	-€ 23.703,75	-€ 33.862,50
<b>Aankoop Zünd</b>	-€ 85.000,00				
<b>Vennootschaps-belasting</b>		-€ 10.301,94	-€ 41.207,74	-€ 72.113,55	-€ 103.019,36
<b>Belastingsschild afschrijvingen</b>		€ 7.222,88	€ 7.222,88	€ 7.222,88	€ 7.222,88
<b>Verdisconteerde CF (maandbasis)</b>	-€ 85.000,00	€ 25.770,13	€ 74.762,07	€ 112.959,92	€ 142.114,27
<b>NCW</b>	€ 270.606,38				

**Tabel 18: Netto contante waarde van de *best case***

De netto contante waarde is in de *best case* bijgevolg ook positief en levert de hoogste waarde op. Het intern rendement bedraagt tweeëntachtig procent.

#### 8.7.5 Gewogen gemiddelde NCW

De resultaten van de verschillende scenario's worden gewogen in tabel 19.

	Worst	Average	Best
<b>NCW</b>	€26.252,0	€181.292,8	€270.606,4
<b>Gewichten</b>	0,25	0,50	0,25
<b>Gewogen NCW</b>	€6.563,0	€90.646,4	€67.651,6
	<b>Som gewogen NCW</b>		
	€164.861,0		

**Tabel 19: Gewogen gemiddelde van de scenario's**

De twee alternatieve scenario's die worden berekend, namelijk de *worst case* en de *best case*, krijgen allebei een waarschijnlijkheid van vijftientig procent mee. De motivering van de keuze van de gewichten is eerder exploratief dan deterministisch. Het is echter

moeilijk om in te schatten wat de vraag gaat doen naar de toekomst toe. De assumptie wordt dus gemaakt dat de kans dat de vraag groter uitvalt dan in de *average case* is even groot als de kans dat die vraag kleiner is.

Het slechtste scenario weegt meer door dan het beste scenario, dus het gewogen gemiddelde ligt iets lager dan de *average case*. Een groot voordeel is dat zelfs al valt de investering tegen, zoals in de *worst case*, dan is het nog steeds een goede investering geweest. Het risico is minimaal bij deze investering. De gewogen NCW geeft aan dat het meer dan waarschijnlijk is dat er een groter rendement behaald wordt voor de investering.

### 8.7.6 Differentiële analyse

Een andere manier om de potentiële productie te verdubbelen, is niet investeren in een nieuwe snijmachine, maar gaan werken in twee shiften op de snijmachine. Door het werken in twee shiften enkel op de snijmachine, verdubbelen de beschikbare uren per jaar. Bijgevolg verdubbelen ook het aantal mogelijke projecten per jaar. Aangezien de kosten in de investeringsanalyse allemaal afhankelijk zijn van de productie of verkopen, is er geen verschil in die kosten tussen de werken in twee shiften en investeren in een nieuwe snijmachine. De differentiële analyse wordt weergegeven in tabel 20 en behoudt het scenario van de *average case*. De investering in een snijmachine is het uitgangspunt en wordt beoordeeld ten opzichte van het werken in twee shiften.

<b>Average case</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Loonkost shiftvergoeding</b>		€ 235,31	€ 3.608,13	€ 3.921,88	€ 4.235,63
<b>Aankoop Zünd</b>	-€ 85.000,00				
<b>Vennootschapsbelasting</b>		-€ 79,98	-€ 1.226,40	-€ 1.333,05	-€ 1.439,69
<b>Belastingsschild afschrijving</b>		€ 7.222,88	€ 7.222,88	€ 7.222,88	€ 7.222,88
<b>Verdisconteerde CF (maandbasis)</b>	-€ 85.000,00	€ 6.599,00	€ 7.811,69	€ 7.134,17	€ 6.512,16
<b>NCW</b>	-€ 56.942,98				

**Tabel 20: Netto contante waarde aankoop snijmachine ten opzichte van werken in twee shiften**

Alle positieve (negatieve) *cashflows* zijn voordelig (nadelig) voor de investering in een nieuwe snijmachine en nadelig (voordelig) voor het werken in twee shiften.

Voor de loonkost is er gekeken naar de loonkost van de arbeiders. De assumptie die gemaakt wordt voor het werken in twee shiften, is dat alle uren op de snijmachine in het systeem van twee shiften worden gewerkt. De loonkost weergegeven in de *cashflow*tabel is dus de shiftvergoeding die betaald wordt voor het werken in twee shiften op de snijmachine. Deze kost is positief omdat dit een besparing in kosten is voor het scenario van de investering.

De aankoop van de snijmachine is een uitgave dus staat negatief weergegeven in de tabel. De besparingen op de shiftvergoeding en de voordelen uit het belastingschild moeten opwegen tegen deze investeringskost om de investering de moeite waard te maken.

De vennootschapsbelasting is hoger bij de investering omdat de loonkosten dalen en de winst stijgt. Het voordeel dat gehaald wordt uit het belastingschild van de afschrijving is namelijk wel een stuk groter, wat over het algemeen dus een belastingvoordeel oplevert voor de investering.

De netto contante waarde blijft echter ver onder nul. De waarde van het alternatief (werken in twee shiften) is ongeveer zevenenvijftigduizend euro meer dan de waarde van de investering. Uit het oogpunt van de investeringsbeslissing is het een beter om te kiezen voor het werken in twee shiften.

#### 8.7.6.1 Perpetuïteit

Om na te gaan of de mogelijkheid bestaat dat de NCW positief kan worden, wordt er gekeken naar een model met perpetuïteit. Door middel van perpetuïteit toe te passen, wordt nagegaan wat de waarde vandaag is van alle toekomstige *cashflows*. De tijdslijmiet valt dus weg. In de formule moet gewerkt worden met een vaste *cashflow* of met een vaste groeivoet van de *cashflows*. De formule is als volgt:

$$PV = \frac{C}{d-g} \quad (4)$$

De *present value* (PV) is gelijk aan de eerste *cashflow* (C) gedeeld door de verdisconteringsvoet (d) verminderd met de groeivoet (g). (LARRAIN, B.) Omdat het

netto contante waarde-model een maximale *cashflow* heeft bij volle bezetting, kan de groeivoet niet opgenomen worden in de formule, aangezien het geen blijvende jaarlijkse groei is. Het is wel belangrijk om rekening te houden met de belastingen en daarom is de formule als volgt aangepast.

$$PV = \frac{C_{max} * (1-b)}{d} + \sum_{i=1}^4 \frac{Afschrijvingschild}{(1+d)^i} \quad (5)$$

Het tarief van de vennootschapsbelasting (*b*) wordt in rekening gebracht en het belastingschild de eerste vier jaren wordt ook in het model opgenomen. In tabel 21 staan de NCW's op oneindig bij verschillende verdisconteringsvoeten.

<b>d</b>	<b>0,12</b>	<b>0,10</b>	<b>0,08</b>	<b>0,0685187</b>	<b>0,06</b>
<b>Perpetuïteit</b>	€56.456,12	€64.316,82	€75.699,67	<b>€85.000</b>	€94.063,48

**Tabel 21: Perpetuïteit bij verschillende verdisconteringsvoeten.**

De kritische verdisconteringsvoet hierbij ligt ongeveer op zes komma acht procent want dan wordt het investeringsbedrag van de snijmachine bereikt. Het besluit kan dus getrokken worden dat bij de hoge verdisconteringsvoet van twaalf procent, de netto contante waarde nooit positief wordt aangezien de voordelige *cashflows* nooit kunnen opwegen tegen de investeringskost van vijftigduizend euro. Een lager vereist rendement op de investering ofwel een lagere discontovoet zal gehanteerd moeten worden om investeren in een tweede machine interessanter te maken.

#### 8.7.6.2 Zonder discontovoet

Dan kan ook onderzocht worden of het mogelijk is dat de NCW positief wordt op vier jaar. Om dit te onderzoeken wordt verondersteld dat enkel op de snijmachine continu in twee shiften gewerkt wordt. Het maximale voordeel wordt bekomen als tijdens alle beschikbare uren in twee shiften effectief gewerkt wordt. Dan is de uit te keren premie het hoogst. Om de impact te maximaliseren, wordt de verdisconteringsfactor buiten beschouwing gelaten. In de onderstaande formule wordt de waarde van de *cashflows* berekend:

$$PV = ((C_{max} * (1 - b)) * 4) + (afschrijvingschild * 4) = €45.460,01 \quad (6)$$

Het resultaat weegt absoluut niet op tegen de investeringskost van vijftigduizend euro. Op een korte termijn van vier jaar zal het dus steeds voordeliger zijn als werken in

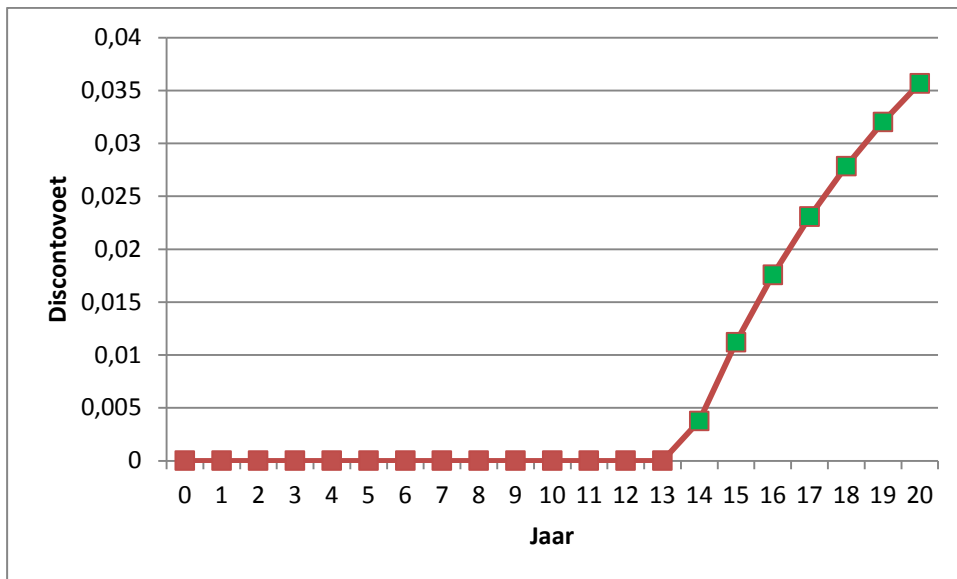
twee shiften gekozen wordt. Onder deze voorwaarden zal de tijdshorizon verlengd moeten worden tot ongeveer dertien jaar en half voordat het interessanter zou zijn om de investering te maken.

## 8.8 Conclusie gevalstudie

Uit de resultaten van de verschillende analyses kan gezegd worden dat het algemeen beeld zeer positief is. De sleutelvariabelen moeten reeds drastisch verslechteren om de netto contante waarde van de initiële analyse te laten kelderen tot onder nul. Die sleutelvariabelen die nauwlettend in het oog gehouden moeten worden zijn de verkoopprijzen en de groei in de bezettingsgraad. De verkoopprijzen vertegenwoordigen de grootste druk op de marge per product. Dit werd duidelijk bij de sensitiviteitsanalyse omdat de variatie van de variabele kosten slechts een minimale invloed uitoefenen op de variatie in de NCW. Het effect van de marge per product wordt dan uitvergroot door de bezetting. Door multiplicatie is het namelijk zo dat hoe hoger de verkoopprijzen en de marge zijn, hoe groter het effect van de bezettingsgroei is op de NCW.

Omdat de bezettingsgroei de meest invloedrijke factor is in de sensitiviteitsanalyse van de initiële productielijn, is deze factor ook als meest bepalende factor gekozen in de analyse van de aankoop van een tweede snijmachine. De scenarioanalyse wees uit dat de groei in bezettingsgraad ook hier een grote invloed uitoefent op de resultaten. Het risico van de investering blijft echter wel eerder beperkt. De lage investeringskost kan op korte termijn terugverdiend worden, ook bij lage bezettingsgraden voor de nieuwe machine.

Omdat dit niet de enige mogelijkheid is om de productie uit te breiden is het meest waarschijnlijke scenario vergeleken met het scenario waarbij in twee posten gewerkt wordt op de snijmachine. De conclusie is duidelijk in het voordeel van werken in twee shiften. Door twee limieten van het model te elimineren, namelijk de duur en de discontovoet, is de *break-even* grens tussen de twee scenario's afgetast. De grens is weergegeven in figuur 28. De twee extremen zijn in kaart gebracht door telkens één van de twee te elimineren om na te gaan wat de waarde van de andere is. De minimale duur om de investering te verkiezen boven het werken in twee shiften, bedraagt dertien en half jaar. Hierbij is de discontovoet nul procent. Vanaf een tijdshorizon van minimaal veertien jaar stijgt de *break even* discontovoet boven nul en is de hoogte van de discontovoet dus bepalend voor het kiezen van het scenario.



**Figuur 27** Grafiek *break even* verhoudingen aan de hand van het jaar en de discontovoet





## 9. Conclusie

Door in het onderzoek na te gaan wat de opties zijn voor het printen van *printable electronics* is een duidelijk beeld gevormd over de breedte van de potentiële markt. Indien de verschillende technologieën op punt staan, zijn een zeer groot aantal toepassingen mogelijk. Verschillende literatuurteksten geven dan ook aan dat de markt van *printable electronics* gaat vermenigvuldigen in de komende jaren. De kanttekening die erbij moet gemaakt worden is wel dat de prestaties moeten verbeteren.

Electroluminescentie is een technologie die reeds goed op punt staat. Het is ook mogelijk om LEC's op grote schaal te produceren. Dit is momenteel nog niet het geval voor de commerciële OLED-toepassingen. Momenteel zijn dit SM-OLED's, die niet van *roll-to-roll processing* gebruik kunnen maken. De PLED kan dit wel, maar haalt nog niet de benodigde efficiëntie. Bijgevolg zijn de OLED-toepassingen nu nog duur. Ook de OPV-technologie is veelbelovend, maar ook daar schiet men nog te kort op vlak van levensduur en efficiëntie. OLED's en OPV kunnen in de toekomst ook nog genieten van een daling in de kosten door schaalvoordelen indien overgeschakeld kan worden naar *roll-to-roll processing*.

De keuze voor een bepaald printtechnologie hangt ook van enkele parameters af. Zo speelt het aantal dimensies een rol voor de mate waarin *patterning* moet worden toegepast. De kost van de inkten voor een bepaalde printtechniek hangt ook samen met de moeilijkheidsgraad van de ontwikkeling van de inkt. De inkten hebben namelijk ook bepaalde vereisten per printtechniek. De juiste volatiliteit en viscositeit van de inkt zijn bepalend voor het slagen van het productieproces en de kwaliteit van de geprinte modules. Om het interessant te maken voor massaproductie is het ook belangrijk dat de printtechniek compatibel is met *roll-to-roll processing*. Dit kan namelijk de kostprijs per oppervlaktemaat drukken. Op labschaal worden vaak de hoogste efficiënties gehaald met *spin coating*. Maar dit is net een techniek die niet schaalbaar is, aangezien dit op kleine oppervlakken gebeurt.

Voor elektroluminescentie is *screen printing* de techniek die het meest verkozen wordt. Het is een eenvoudige, veel onderzochte techniek, die al bestaat van het begin van de 20<sup>e</sup> eeuw. De printsnelheid is gunstig omdat het schaalbaar is tot een *roll-to-roll* proces met de mogelijkheid tot printen in twee dimensies. Voor OLED en OPV is de strijd voor de best passende printtechniek nog niet gevonden. Aangezien *spin coating* geen *roll-to-roll* techniek is, komt deze niet in aanmerking. Voor OLED is bijvoorbeeld *offset gravure* een

goede optie omdat deze techniek hoge snelheden kan behalen met een hoge accuraatheid. Voor OLED en OPV is het ook kijken naar nieuwere technieken zoals *ink jet printing*. Dit is een digitale printtechniek die moeilijke structuren met een hoge accuraatheid kan aanbrengen. Het nadeel is echter dat de techniek momenteel nog niet de snelheid haalt van *gravure* of *flexographic printing*.

Andere processtappen zijn de droger, de laminator en de snijmachine. De droger en de laminator werden kort besproken. Heteluchtdrogers worden het vaakst gebruikt. De aankoopprijs ligt lager en voor het droger moeten geen speciale inkten voorzien worden in tegenstelling tot bij *UV-curing*. Nog niet alle printtechnieken kunnen *UV-curable* inkten gebruiken om dat de inkten nog niet bestaan. Voor de keuze van de laminator zijn drie opties beschikbaar. Koude of warme laminatie of *UV-coating*. Meestal valt de keuze op warme of koude laminatie maar bij productielijnen met een zeer grote bezetting kan het ook een optie zijn om voor *UV-coating* te kiezen. De hoge aankoopprijs kan terugverdiend worden door de lagere kosten voor het *coating*-materiaal.

De keuze voor de netto contante waarde analyse uit te breiden met een Monte Carlo simulatie was nodig om de invloed van parameters in het model verder te gaan onderzoeken. Het model kan leiden onder zwaarwegende parameters. Een afwijking in een dergelijke parameter zou de NCW zwaar kunnen aantasten en de investeringsbeslissing afgeleid vanuit de NCW-analyse in vraag kunnen stellen.

De *case study* heeft aangetoond dat voor elektroluminescentie een investering in een productielijn interessant kan zijn. Indien beslissende parameters, die geïdentificeerd werden bij de Monte Carlo simulatie, onder controle kunnen gehouden worden, is de slaagkans van het investeringsproject zeer groot. Als de jaarlijkse groei in de bezettingsgraad en de verkoopprijzen niet op pijl gehouden worden, dan is de marge tot een netto contante waarde van nul nog steeds relatief groot. In deze *case study* levert dat geen onmiddellijk gevaar op.

Voor de nieuwe snijmachine geldt ook een positief investeringsadvies. Het is echter wel goedkoper om op de oude snijmachine in twee posten te werken indien dit geen complicaties met zich meebrengt voor de productieplanning.

Hiermee is aangetoond dat voor een KMO het mogelijk is om met *printable electronics* te starten. Belangrijke factoren in het succes voor de slaagkans van het investeringsproject zijn de bezettingsgraad van de productielijn en de verkoopprijzen.

Deze conclusie mag wel niet doorgetrokken worden voor OLED en OPV. Elektroluminescentie is namelijk een techniek die reeds goed onderzocht is en goed op punt staat. OLED en OPV zijn technologieën waarbij de prestaties van de geprinte modules in *roll-to-roll* opstelling nog moeten verbeteren voordat zij in overweging kunnen genomen worden voor consumententoepassingen.



## 10. Lijst van geraadpleegde werken

- ABILEAH, A., HARKONEN, K., PAKKALA, A., SMID, G. (2008). *Transparant Electroluminescent (EL) Displays*. Beaverton, Oregon: Planar Systems, Inc.
- AMMERMANN, D., BÖHLER, A., WOLFGANG, K. (1995). Multilayer Organic Light Emitting Diodes for Flat Panel Displays. *Institut Für Hochfrequenztechnik*, 48-58.
- AZZOPARDI., B., EMMOTT, C.J.M., URBINA, A., KREBS, F.C., et al. (2011). Economic assessment of solar electricity production from organic-based photovoltaic modules in a domestic environment. *Energy & Environmental Science*, 3741-3753.
- BURROUGHES, J.H., BRADLEY, D.D.C., BROWN, A.R., MARKS, R.N., MACKAY, K. . (1990). Light-emitting diodes based on conjugated polymers. *Nature*, 539-541.
- CANTATORE, E. (2012). *Applications of Organic and Printed Electronics: A Technology-Enabled Revolution*. Eindhoven: Springer.
- CHOY, W. (2013). *Organic Solar Cells Materials and Device Physics*. Londen: Springer.
- CMK, UHASSELT, EES, K.U. LEUVEN. (2012). *Organische zonnecellen als rechtstreekse energiebron voor consumentenelektronica*.
- COSTA, R.D., ORTI, E., BOLINK, H.J. (2011). Recent advances in light emitting electrochemical cells. *Pure and Applied Chemistry*, 2115-2212.
- COSTELLO, A., DOHERTY, D., LEBEAU, J., WARREN, R. (2010). *Multilayer Polymer Inkjet Printing*. Worcester: Worcester Polytechnic Institute.
- DAM, H.F., KREBS, F.C. (2012). Simple roller coater with variable coating and temperature control for printed polymer solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 191-196.
- DE GANS, B-J., DUINEVELD, P.C., SCHUBERT, U.S. (2004). Inkjet Printing of Polymers: State of the Art Developments. *Advanced Materials*, pp. 203-213.
- DE GELISSEN, M. (2007). *Investeringsanalyse met gevalstudie bij Ford Genk*. UHasselt.
- DEGANELLO, D., CHERRY, J.A., GETHIN, D.T., CLAYPOLE, T.C. (2010). Patterning of micro-scale conductive networks using reel-to-reel flexographic printing. *Thin Solid Films*, 6113-6116.

- DEIBEL, C., DYAKONOV, V. (2010). *Polymer–fullerene bulk heterojunction solar cells*. Bristol: IOP Publishing.
- DI, C., ZHANG, F., ZHU, D. (2012). Multi-functional Integration of Organic Field-Effect Transistors (OFET): Advances and Perspectives. *Advanced materials*, 313-330.
- EHRENBERG, R. (2013). The 3-D Printing Revolution. *Science News*, 20-25.
- ENGLUND, C., VERIKAS, A. (2009). Ink feed control in a web-fed offset printing press. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 919-930.
- Federale Overheidsdienst Werkgelegenheid, Arbeid en Sociaal Overleg. (sd). Opgehaald van [http://www.werk.belgie.be/detailA\\_Z.aspx?id=926](http://www.werk.belgie.be/detailA_Z.aspx?id=926)
- FYFE, D., NICKLIN, T. (2004). A bright future. How chemicals drive the way we display information. *Ingenia*, 15-19.
- GASMAN, L. (2008). Applications-based assessment for the printable electronics market. *Solid State Technologie*, 48-52.
- GAUDIANA, R. (2012). Organic Photovoltaics: Challenges and Opportunities. *Journal of Polymer Science*, 1014-1017.
- GONZALEZ-MACIA, L., MORRIN, A., SMYTH, M.R., KILLARD, A.J. (2010). Advanced printing and deposition methodologies for the fabrication of biosensors and biodevices. *The Royal Society of Chemistry*, 845-867.
- GRAPHIC ARTS. (sd). *UV coating vs lamination*. Opgehaald van <http://graphicartsmag.com/articles/2011/05/uv-coating-vs-lamination/>
- GUO, Y., YU, G., LIU, Y. (2010). Functional Organic Field-Effect Transistor. *Advanced materials*, 4427-4447.
- GUTOFF, E.B., COHEN, E.D. (2006). *Coating and Drying Defects: Troubleshooting Operating Problems*. New Jersey: Wiley.
- HABITOS. (sd). *Groenestroomcertificaten*. Opgehaald van <http://www.oled-http://habitos.be.msn.com/nl/duurzaam-wonen/groenestroomcertificaten-3920/>
- HACURA, A., JADAMUS-HACURA, M., KOCOT, A. (2001). Risk analysis in investment appraisal based on the Monte Carlo simulation technique . *The European Physical Journal B*, 551-553.

- HART, J.A., LENWAY, S.A., MURTHA, T. (1999). *A History of Electroluminescent Displays*.  
Opgehaald van <http://www.indiana.edu/~hightech/fpd/papers/ELDs.html>
- HELGESEN, M., SONDERGAARD, R., KREBS, F.C. (2009). Advanced materials and processes for polymer solar cell devices. *Journal of Materials Chemistry*, 36-60.
- HENDRICKX, N., SUGAL, H., et al. (2005). Laser Ablation and Laser Direct Writing as Enabling Technologies for the Definition of Micro-Optical Elements. *Conference*, 59561B/01-10 pages.
- HONGZHENG, J. (2009). *Novel Patterning Methods for Full-Color Polymer Light-Emitting Displays*. Princeton: Princeton University Press.
- IDTECHEX. (2007). *Organic & Printed Electronics Forecasts, Players & Opportunities*.  
Opgehaald van <http://media.idtechex.com/pdfs/en/U3021T7639.pdf>.
- JOHNSON, A.R. (2008). *White-light Generation and OLED Lifetime Issues*. Michigan: Proquest LLC.
- KHATY, N.T., MULEY, A.A., UGEMUGE, N.S., JOSHI, M.P., et al. (2012). A Review - The development in organic light emitting diodes (OLEDs) the future of displays. *Internal Journal of Knowledge Engineering*, 89-90.
- KING, C.N. (2012). *Electroluminescent Displays*. Opgehaald van Planar: [http://arc.planar.com/support/design-resources/docs/ELD\\_200307.pdf](http://arc.planar.com/support/design-resources/docs/ELD_200307.pdf)
- KOLA, S., SINHA, J., KATZ, H.E. (2012). Organic Transistors in the New Decade. *Polymer Physics*, 1090-1120.
- KOPOLA, P., TUOMIKOSK, M., SUHONEN, R., MAANINEN, A. (2009). Gravure printed organic light emitting diodes for lighting applications. *Thin Solid Films*, p5757-5762.
- KREBS, F.C. (2009A). Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 394-412.
- KREBS, F.C. (2009B). Pad printing for film forming technique for polymer solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 484-490.
- KREBS, F.C., FYENBO, J., JORGENSEN, M. (2010). Product integration of compact roll-to-roll processed polymer solar cell modules: methods of manufacture using



- flexographic printing, slot die *coating* and rotary screen printing. *Journal of Materials Chemistry*, 8994-9001.
- KREBS, F.C., FYENBO, J., TANENBAUM, D.M., GEVORGYAN, S.A. et al. (2011). The OE-A OPV demonstrator anno domini 2011. *Energy & Environmental Science*, 4116-4123.
- KREBS, F.C., JORGENSEN, M., NORRMAN, K., HAGEMANN, O. et al. (2009). A complete process for production of flexible large area polymer solar cells entirely for screen printing - First public demonstration. *Solar Energy Materials & Solar Cells* , 422-441.
- KREBS, F.C., NIELSEN, T.D., FYENBO, J., WADSTROM, M., et al. (2009). Manufacture, integration and demonstration of polymer solar cells in a lamp for the "Lightning Africa" initiative. *Energy & Environmental Science*, 512-525.
- KRÖGER, M. (2007). *Device and Process Technology for Full-Color Active-Matrix OLED Displays*. Göttingen: Cuvillier Verlag.
- KRONHOLM, D., HUMMELEN, J.C. (2008). *A new material for high-performance solar cells*. Groningen: SPIE Newsroom.
- KYMISSIS, I. (2009). *Organic Field Effect Transistor: Theory, Fabrication and Characterization*. New York: Springer.
- LAMINATORS. (sd). *Should I use a hot or cold laminator?* Opgehaald van [http://www.laminators.com/laminating\\_pouches.htm](http://www.laminators.com/laminating_pouches.htm)
- LANDAU, D.P., BINDER, K. (2009). *Monte-Carlo Simulations in Statistical Physics*. New York: Cambridge University Press.
- LARRAIN, B. (sd). *Perpetuities and Annuities EC 1745*. Opgehaald van <http://isites.harvard.edu/fs/docs/icb.topic463891.files/c03.pdf>
- LEE, T., NOH, J., KIM, I., KIM, D., CHUN, S. . (2010). Reliability of gravure offset printing under various printing conditions. *Journal of Applied Physics*, 102802-6p.
- LEENEN, M.A.M., ARNING, V., THIEM, H., STEIGER, J., ANSELMANN, R. (2009). Printable electronics: flexibility for the future. *Physica status solidi*, 588-597.
- LIN, C., WANG, B., TIU, C., LIU, T. (2012). On the Pinning of Downstream Meniscus for Slot Die *Coating*. *Advances in Polymer Technology*, E249-E257.

- LIU, R., CAI, Y., PARK, J., HO, K., et al. (2011). Organic Light-Emitting Diode Sensing Platform: Challenges and Solutions. *Advanced Functional Materials*, 4744-4753.
- MCLANEY, E. (2009). *Business Finance, Theory and Practice*. Essex: Pearson Education Ltd.
- MEDFORD, A.J., LILLIEDAL, M.R., JORGENSEN, M., AARO, D., et al. (2010). Grid-connected polymer solar panels: initial considerations of cost, lifetime, and practicality. *Optical Society of America*, 272-285.
- MEIER, R., BIRKENSTOCK, C., PALUMBINY, C.M., MÜLLER-BUSCHBAUM, P. (2012). Efficiency-improved organic solar cells based on plasticizer assisted soft embossed PEDOT:PSS layers. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 15088-15098.
- MERCKEN, R. (2004). *De investeringsbeslissing: een beleidsgerichte analyse*. Antwerpen-Apeldoorn: Garant.
- MOLESA, S.E. (2006). *Ultra-Low-Cost Printed Electronics*. Berkeley: University of California.
- MOORING, L., KAROUSOS, N.G., LIVINGSTONE, C., DAVIS, J., et al. (2005). Evaluation of a novel pad printing technique for the fabrication of disposable electrode assemblies. *Sensors and Actuators*, pp. 491-496.
- MORSE, J.D. (2011). *Nanofabrication Technologies for Roll-to-Roll Processing*. NIST-NNN Workshop.
- MÜLLER, D.C., FALCOU, A., RECKEFUSS, N., ROJAHN, M., et al. (2003). Multi-colour organic light-emitting displays by solution processing. *Nature*, 829-833.
- NANOMARKETS. (2011). *Advanced Encapsulation for Photovoltaics: Where are the Opportunities*. Opgehaald van [http://nanomarkets.net/articles/article/advanced\\_encapsulation\\_for\\_photovoltaics\\_where\\_are\\_the\\_opportunities](http://nanomarkets.net/articles/article/advanced_encapsulation_for_photovoltaics_where_are_the_opportunities)
- NATGRAPH. (sd). *Drying & Curing Systems*. Opgehaald van <http://www.natgraph.co.uk/drying-and-curing-systems/>
- OLED-INFO. (A). *Oled technology explained*. Opgehaald van <http://www.oled-info.com/oled-technology>
- OLED-INFO. (B). *P-OLED*. Opgehaald van <http://www.oled-info.com/p-oled>

- OLED-INFO. (C). *OLED introduction and basic OLED information*. Opgehaald van <http://www.oled-info.com/introduction>
- ONO, Y.A. (1995). *Electroluminescent Displays*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. LTD.
- PAKKALA, A. (sd). *EL Displays Based on ALE Grown Phosphors and Insulator Thin Films*. Opgehaald van <http://www.planarembded.com/whitepapers/assets/alephosph.pdf> Planar:
- PARK, E. (2008). *Physics of Coating Tensioned-Web Over Slot Die*. Minnesota: University of Minnesota.
- PEREIRA, L. (2012). *Organic Light Emitting Diodes: The Use of Rare Earth and Transition Metals*. Singapore: Pan Stanford Publishing Pte. Ltd.
- PERELAER, J., SMITH, P., et al. (2010). Printed electronics: the challenges involved in printing devices, interconnects and contacts based on inorganic materials. *Journal of Materials Chemistry*, 8446-8453.
- PERKINSON, J.C. (2009). *Organic Field Effect Transistor*.
- PLANAR. (2008, April). *Electroluminescent (EL) Display Technology FAQ*. Opgehaald van <http://www.planarembded.com/electroluminescent-display/el/assets/Electroluminescent-Displays-FAQ.pdf>
- PNEAC. (sd). *Print process descriptions: printing industry overview: flexography*. Opgehaald van Printers' National Environmental Assistance Center: <http://www.pneac.org/printprocesses/flexography/>
- Portaal België. (sd). *Informatie en diensten van de overheid*. Opgehaald van [http://www.belgium.be/nl/belastingen/inkomstenbelastingen/vennootschappen/aangifte/vestiging\\_van\\_de\\_aanslag/](http://www.belgium.be/nl/belastingen/inkomstenbelastingen/vennootschappen/aangifte/vestiging_van_de_aanslag/)
- SASABE, H., KIDO, J. (2013). Development of high resolution OLEDs for general lighting. *Journal of Materials Chemistry C* , 1699-1707.
- SAVASTANO, D. (sd). *The Conductive Ink Market*. Opgehaald van Printed Electronics Now: <http://www.printedelectronicsnow.com/articles/2012/04/the-conductive-ink-market>

- SCHWARTZ, E. (2006). *Roll-to-roll Processing for Flexible Electronics*. Ithaca, New York: Cornell University press.
- SCOTT. (2013). *Setting a Marketing Budget*. Opgehaald van <http://www.imageworksstudio.com/blog/setting-marketing-budget/index.html>
- SHEDD, M., OSTROUT, N. (2011). *Variability of electroluminescent displays*. California: California Polytechnic State University.
- SHINAR, J. (2004). *Organic Light-Emitting Devices: a survey*. New York: Springer.
- SHINAR, J. (2004). *Organic Light-Emitting Devices: a survey*. New York: Springer.
- SHON, P.K., SHIN, J.H., KIM, G.C., LEE, S.N. (2012). Enhanced luminescence related to transparent conductive oxide ZnS-based EL device fabricated by screen printing. *Journal of Luminance*, 1764-1767.
- SONDERGAARD, R., HÖSEL, M., ANGMO, D., LARSEN-OLSEN, T.T., KREBS, F.C. (2012). Roll-to-roll fabrication of polymer solar cells. *Materials today*, 36-49.
- SPANGGAARD, H., KREBS, F.C. (2004). A brief history of the development of organic and polymeric photovoltaics. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 125-146.
- STEIM, R., KOGLER, R.F., BRABEC, C.J. (2010). Interface materials for organic solar cells. *Journal of Materials Chemistry*, 2499-2512.
- TANG, C.W., VANSLYKE, S.A. (1987). Organic Electroluminescent Diodes. *Applied Physics Letters*, 913-915.
- TANG, C.W., VANSLYKE, S.A. (1989). Electroluminescence of doped organic thin films. *Journal of Applied Physics*, 3610-3616.
- TEICHLER, A., PERELAER, J., SCHUBERT, U.S. (2012). Inkjet printing of organic electronics – comparison of deposition techniques and state-of-the-art developments. *Journal of Materials Chemistry C*, 1910-1925.
- THOMOPOULOS, N.T. (2013). *Essentials of Monte Carlo Simulation*. New York: Springer.
- TÖRNQVIST, R. (2005). *TFEL Color by White*. Opgehaald van Planar International Ltd.: <http://arc.planar.com/support/design-resources/docs/cbw2.pdf>

- TRIPATHI, P., JOYCE, M., LEE, D.I., FLEMING, P.D., et al. (2006). *A Study for the Statistical Optimization of a High Speed Curtain Coater*. Michigan: Western Michigan University.
- TSE Troller AG. (sd). *Packaging International*. Opgehaald van Die *Coating Technology, Premetered Coating Methods, Slot Curtain and Slide Dies*: <http://www.packaging-int.com/suppliers/tse-troller-ag.html>
- WIDMANN, D., MADER, H., FRIEDRICH, H. (2000). *Technology of Integrated Circuits*. Berlijn - Heidelberg: Springer.
- WILLIAM, D. (2000). The total cost of ownership. *American school & university*, 48-49.
- XIONG, Y., XU, W., LI, C., LIANG, B. et al. (2008). Utilizing white OLED for full color reproduction in flat panel display. *Organic Electronics*, 533-538.
- YE, S., TIONG, R. (2000). NPV-at-Risk Method in Infrastructure Project Investment Evaluation. *Journal of Construction Engineering and Management*, p227-233.
- YLÖNEN, Y., NEUVONEN, S. (2010). *Bit Bang Rays to the Future*. Helsinki: Helsinki University Print.
- YOON, D., KIM, D. (2011). *Roll to Roll Printing in Electronics Applications*. Opgehaald van Industrial + Specialty Printing: <http://industrial-printing.net/content/roll-roll-printing-electronics-applications?page=0%2C4#.UXBYrLWeOrk>
- ZX-PRINTING COMPANY. (sd). *Planographic or lithographic printing*. Opgehaald van <http://www.zx-printing.com/support/4.html>

## 11. Bijlagen

### 11.1 Overzicht belangrijke assumpties

<b>Bezetting</b>		
	Bezettingsgraad eerste jaar	15%
	Jaarlijkse groei in bezetting	15%
<b>Investerings</b>		
	Printer en droger worden geleased met aankoopoptie	
	Laminator en snijmachine worden gekocht	
<b>Procesduur</b>		
	Geen projecten tegelijkertijd in productie	
	Totale proces duurt 150% van de duur op de <i>bottleneck</i>	
<b>Lonen</b>		
	Arbeiders	variabel
	Artwork	variabel
<b>Uitval</b>		
	Kleine projecten	1 m <sup>2</sup> inktverlies
	Grote projecten	10% inktverlies
<b>Operationeel</b>		
	Substraat per 16 segmenten druk	5 panelen
	Tooling per project (16 segmenten)	1 keer
	Tooling per project (32 segmenten)	2 keer
	Tooling per project (48 segmenten)	3 keer
	Tooling per project (64 segmenten)	4 keer
<b>Verdiscontering</b>		
	Maandelijkse verdiscontering	

## Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:

**Een economische analyse voor de investering in <i>printed electronics</i>.  
<i>Gevalstudie</i>: Lumoza NV**

Richting: **master in de toegepaste economische wetenschappen:  
handelsingenieur-operationeel management en logistiek**

Jaar: **2013**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

**Strackx, Didier**

Datum: **22/08/2013**