

10 Opto-elektrische sensoren

10.1 Inleiding

Bij opto-elektrische verplaatsingssensoren zijn steeds drie elementen van belang: de lichtbron, de ontvanger en het medium. Vaak zijn nog extra optische hulpmiddelen vereist, zoals lenzen, golfgeleiders, spiegels of filters. Optische verplaatsingssensoren zijn zodanig geconstrueerd, dat een variatie in de afstand tussen twee sensordelen of tussen de sensor en een verplaatsbaar voorwerp een verandering teweegbrengt in de transmissie, reflectie, absorptie, verstrooiing of breking van een lichtbundel. De meeste sensorprincipes in deze categorie zijn gebaseerd op reflectie, enkele maken gebruik van transmissie (maar dan wel binair). Zelden worden de overige mogelijkheden benut. De meest voorkomende lineaire meetmethode berust op het bepalen van een intensiteitsverandering als gevolg van afstandsvariaties. Omdat licht een zich voortplantende golf is, kan ook gebruik worden gemaakt van looptijd of van faseverschuivingen (interferometrie).

Het toepassen bij daglicht of kunstlicht vereist doorgaans extra maatregelen, om de invloed van omgevingslicht op het sensorsysteem te elimineren.

Optische meetsystemen hebben een aantal belangrijke voordelen t.o.v. hun elektrische tegenhangers.

- Zo kan er geen elektromagnetische koppeling optreden ten gevolge van externe storende spanningen.
- Er kan geen elektrische storing optreden ten gevolge van meerdere aardingspunten.
- Optische systemen waarborgen een grotere veiligheid. De bron, de detector en de signaalverwerkende elementen met hun bijbehorende voedingen kunnen in een veilige ruimte, zoals de controle kamer, opgesteld worden. Alleen de optische vezels, die dienst doen als transmissiemedium bevinden zich in de gevarezone. Hierdoor is het gevaar voor een elektrische vonk, welke een explosie zou kunnen veroorzaken, onbestaande.
- Het meetsysteem is inherent compatibel met optische communicatiesystemen.
- Optische vezels kunnen zeer dicht bij elkaar geplaatst worden zonder gevaar voor wederzijdse storingen of overspraak (Eng.: Crosstalk).

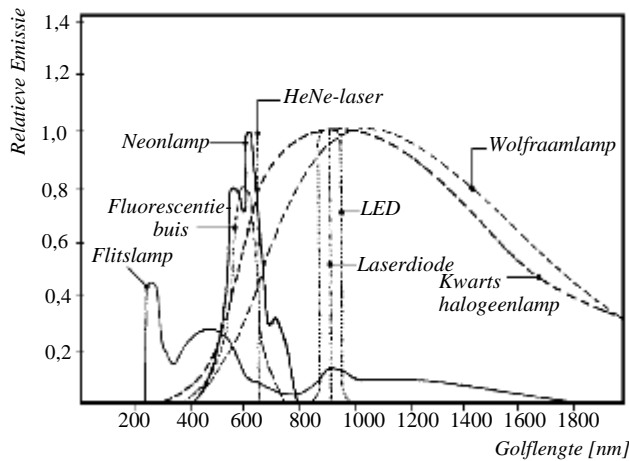
Het grote nadeel van een optisch meetsysteem is de invloed van omgevingslicht en belangrijker de gevoeligheid aan vervuiling van de meetomgeving.

10.2 Lichtbronnen

Gangbare bronnen voor sensordoeleinden zijn:

- *gloeilamp* of *halogeenlamp*: eenvoudig, breed spectrum, traag, niet gefocusseerde bundel;
- *LED* (licht-emitterende diode): klein, goedkoop en smaller spectrum; in intensiteit goed moduleerbaar; verkrijgbaar met lens; infrarood uitvoeringen (niet hinderlijk voor omgeving);
- *halfgeleider-laser* of *laserdiode*: klein, duurder; in intensiteit moduleerbaar; matige bundeling (als LED), verkrijgbaar met lens; monochromatisch licht;
- *gaslaser*: grotere afmetingen; duur; monochromatisch licht; smalle bundel, niet moduleerbaar (externe hulpmiddelen vereist).

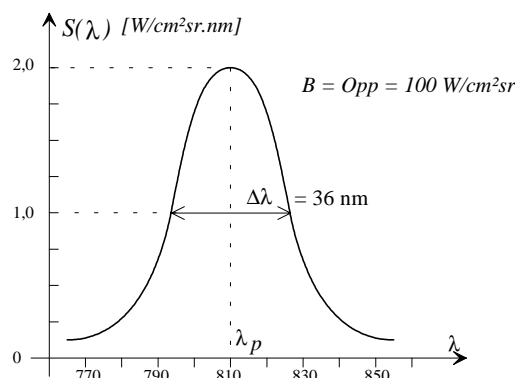
De lichtbronnen bezitten meestal een continue band van golflengtes, met uitzondering van de lasers. Figuur 2.61 geeft een vergelijkend overzicht tussen de verschillende soorten lichtbronnen. De golflengtes van deze bronnen liggen meestal tussen 400 nm en 10 μm . Dit is zichtbaar (400 nm tot 700 nm) of infrarood (700 nm tot 100 μm) licht.



Figuur 2.61: Relatieve emissie van verschillende lichtbronnen.

De intensiteit van een bron wordt weergegeven door de spectrale vermogendichtheidsfunctie of spectrale radiantie $S(\lambda)$ [$\text{W}/\text{cm}^2\text{sr}\cdot\mu\text{m}$]. De hoeveelheid vermogen (energie per seconde) die door 1 cm^2 van de bron in een eenheidsruimtehoek [sterradiaal, sr], uitgezonden wordt met golflengtes tussen λ en $\lambda + \Delta\lambda$ is per definitie gelijk aan $S(\lambda)\Delta\lambda$. Het totaal uitgezonden vermogen over alle golflengtes is dan $B = \int_{-\infty}^{\infty} S(\lambda)d\lambda$ [$\text{W}/\text{cm}^2\text{sr}$], dit is de helderheid of radiantie (Eng.: Brightness of Radiance). De spectrale stralingsintensiteit I_λ (Eng.: Radiant Intensity) op een golflengte λ van een bron met oppervlak A_s [cm^2], volgens een normale op dit oppervlak, is $I_\lambda = A_s S(\lambda)$ [$\text{W}/\text{sr}\cdot\mu\text{m}$]. De totale stralingsintensiteit I_e die hiermee overeenstemt, is de integraal over alle golflengtes nl., $I_e = \int_{-\infty}^{\infty} A_s S(\lambda)d\lambda = A_s B$ [W/sr].

Figuur 2.62 toont een typische spectrale vermogendichtheidsfunctie $S(\lambda)$ voor een GaAlAs LED. $S(\lambda)$ heeft een piek bij $\lambda_p = 810$ nm en een bandbreedte $\Delta\lambda$ van 36 nm: de oppervlakte onder de curve, dit is de radiantie B , bedraagt ongeveer $100 \text{ W}/\text{cm}^2\text{sr}$. De totale stralingsflux (Eng.: radiant flux) ligt normaal tussen 1 en 10 mW.



Figuur 2.62: Spectrale vermogendichtheidsfunctie of spectrale radiantie $S(\lambda)$ voor een GaAlAs LED.

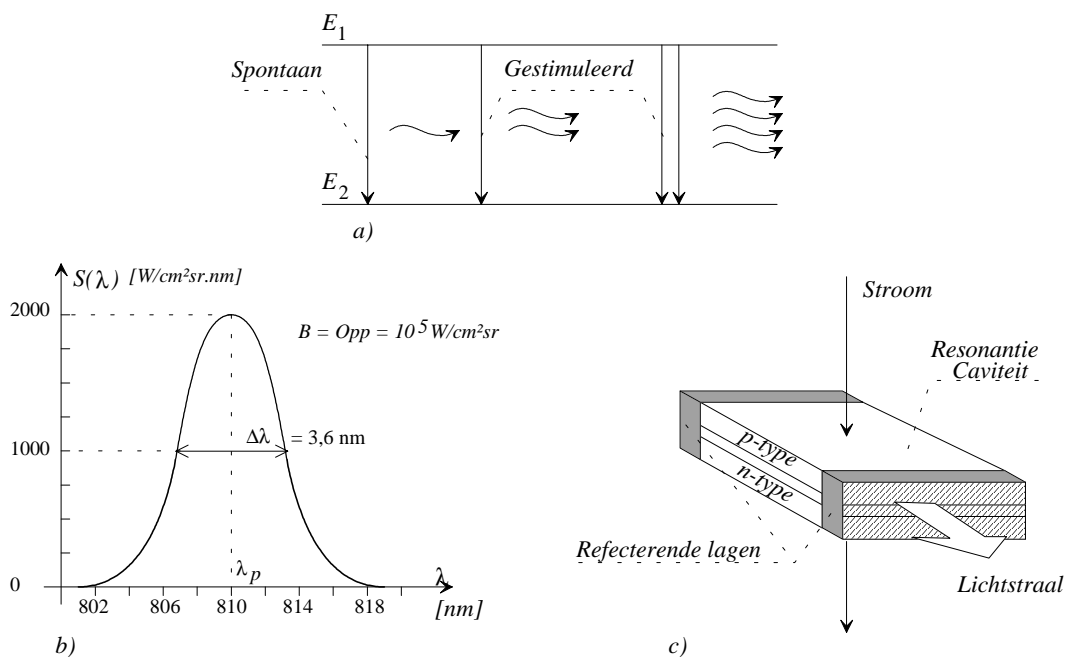
Laserbronnen

Er bestaan verschillende soorten lasers, waarvan het medium een gas, een vloeistof, een vaste stof (kristal) of een halfgeleider kan zijn. Alle types werken op hetzelfde principe. Volgens het energiediagram uit figuur 2.63.a heeft het medium twee energieniveaus: het grondniveau E_1 en de geëxciteerde toestand E_2 . Een overgang tussen deze twee toestanden gaat gepaard met de absorptie of de emissie van een foton met energie:

$$hf = E_2 - E_1$$

waarbij h de constante van Planck en f de frequentie van de straling is.

Indien het medium in thermisch evenwicht is, bevinden de meeste elektronen zich in de grondtoestand E_1 . Slechts enkele hebben voldoende thermische energie voor de geëxciteerde toestand E_2 . Wanneer de laser 'opgeladen' wordt door een externe bron, treedt er een *populatie inversie* op, waarbij zich meer elektronen in de geëxciteerde dan in de grondtoestand bevinden. De elektronen keren dan willekeurig terug van geëxciteerde naar grondtoestand met emissie van een foton (met energie hf): dit is de *spontane emissie*. Wanneer dit éne foton een ander elektron aanzet terug te keren naar de grondtoestand waarbij een secundair foton vrijkomt dat in fase is met het eerste, spreken we van *gestimuleerde emissie*. Dit is de sleutel tot het werkingsprincipe van de laser. De twee fotonen creëren er dan vier, enzovoort.



Figuur 2.63: Laser bronnen: a) Spontane en gestimuleerde emissie, b) voor GaAlAs laserdiode en c) constructie van een halfgeleider laserdiode.

Toevoegen van een resonantiecaviteit bevordert dit proces. De weerszijden van de caviteit zijn spiegels welke de fotonen in de caviteit terugkaatsen, zodat een verdere vermenigvuldiging van fotonen plaatsvindt. De afstand tussen de spiegels moet gelijk zijn aan een geheel veelvoud van de golflengte λ ($\lambda = c/f$) om de resonantie te bewerkstelligen. De fotonen verlaten de caviteit door een smal gaatje in een van de spiegels. Zo ontstaat een smalle intense, *monochromatische* (bijna één enkele golflengte), *coherente* lichtstraal. Coherent betekent dat verschillende punten in de lichtstraal dezelfde fase bezitten.

Halfgeleider injectie laserdiodes (ILD's) worden gebruikt met optische vezelverbindingen. Ze bestaan uit hetzelfde materiaal, GaAlAs en InGaAsP, als de LED's maar geven een beter gefocuseerde, coherente straal met een veel kleinere spectrale bandbreedte $\Delta\lambda$. Figuur 2.63.b toont een typische $S(\lambda)$ voor een GaAlAs ILD met $\lambda_p = 810$ nm, $\Delta\lambda = 3,6$ nm en radiantie $B = 10^5$ W/cm²sr. De stralingsflux ligt typisch tussen 1 en 10 mW. Figuur 2.63.c geeft schematisch de constructie van een ILD.

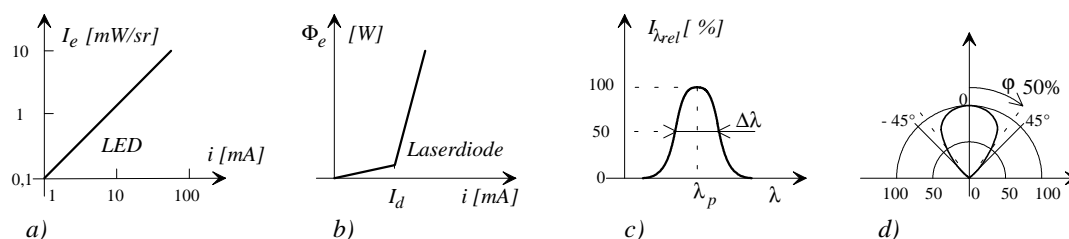
Samengevat

De LED en de halfgeleiderlaser zijn vanwege hun compacte vorm en uitstekende optische eigenschappen aan te bevelen. Figuur 2.64 geeft nog enkele (vergelijkende) karakteristieken. De maximale lichtsterkte is afhankelijk van het type LED. Ze is het grootst bij de infraroodbronnen. De piek-golflengte (figuren 2.62, 2.63.b en 2.64.c) wordt bepaald door het halfgeleidermateriaal waaruit de PN-laag is opgebouwd. Tabel 2.6 geeft enkele waarden. Tussengliggende golflengtes (kleuren) zijn ook beschikbaar; zij worden verkregen door kleine toevoegingen van andere materialen. De *optische bandbreedte* $\Delta\lambda$ ligt in de orde van 20 tot 40 nm voor een LED en is enkele nm voor de laserdiode. De bundelbreedte (volgens figuur 2.64.d) hangt af van de constructie en het al dan niet aanwezig zijn van een ingebouwde lens; voorkomende bundelbreedtes liggen tussen 5 en 70 graden.

Materiaal	Golflengte	Kleur
GaP	555-590 nm	groen-geel
GaAsP	630-655 nm	oranje-rood
GaAlAs	770-850 nm	rood
GaAs	930 nm	infrarood
InGaAsP	1300-1600 nm	infrarood

Tabel 2.6: Piekgolflengtes voor verschillende soorten LED's.

Bij laserdioden is de bundel niet rotatiesymmetrisch; men geeft meestal twee afzonderlijke waarden op voor de horizontale en de verticale richting. Voorbeeld: 10 respectievelijk 40 graden. In de behuizing van een laserdiode is vaak een fotodiode ingebouwd, om de intensiteit te regelen.



Figuur 2.64: Overdrachtskarakteristieken van a) een LED en b) een laserdiode. c) Procentueel emissiespectrum en d) richtingsdiagram.

10.3 Lichtontvangers

Gangbare ontvangers voor optische sensorsystemen zijn:

- *fotoweerstand*: klein, goedkoop, gevoelig voor zichtbaar en infrarood licht; geen richtingsselectiviteit, traag;
- *fotodiode*: klein, goedkoop, gevoelig voor zichtbaar en infrarood licht; matige hoekselectiviteit; met lens verkrijgbaar; grote bandbreedte;
- *fototransistor*: als fotodiode, echter trager;
- *diode-array* ('*solid state*' *lineaire sensoren*): rij diodes in een behuizing; van enkele stuks tot meer dan 2000; 'random access' (n adreslijnen voor 2^n diodes);
- *PSD* ('*position-sensitive*' *diode*): plaatsgevoelige diode (zie paragraaf 10.8); radiometrische eigenschappen als fotodiode, 1- en 2-dimensionaal;
- *CCD-camera* ('*Charge Coupled Device*'): 1- en 2-dimensionaal, uiteenlopende resolutie, tot 500×1000 .

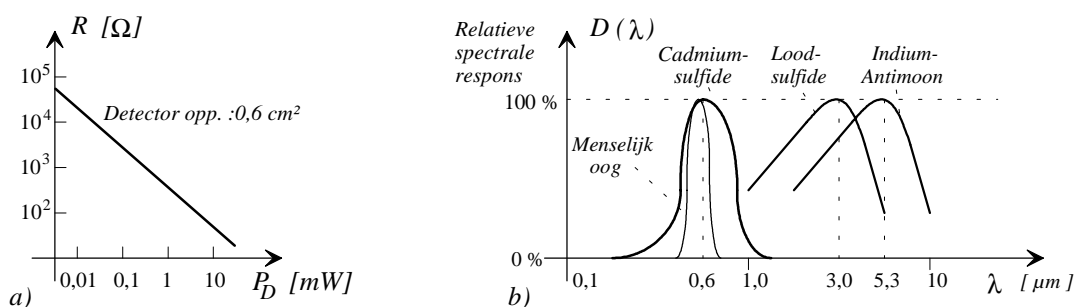
De lichtontvanger of de lichtdetector zet het invallend licht (vermogen) om in een elektrische uitgang (weerstand, spanning of stroom).

Fotodetectors zijn halfgeleiders waarbij invallende fotonen of straling de elektronen exciteren tot geleiding (van valentieband naar geleidingsband), waardoor een meetbaar effect ontstaat. De detectors reageren enkel op deze fotonen welke een energie-inhoud hc/λ bezitten die ongeveer gelijk is aan het energieverval E_G tussen valentie- en geleidingsband. Fotodetectors hebben derhalve een smalle spectrale responscurve $D(\lambda)$ met een piek bij de golflengte $\lambda_p \approx hc/E_G$. Er bestaan twee belangrijke typen fotodetectors: fotoweerstanden gebaseerd op *fotogeleiding* en de *fotovoltatische* detectors, waaronder de fotodiode en de fototransistor.

Fotoweerstanden

Bij de fotoweerstanden veroorzaken de geëxciteerde elektronen in de geleidingsband een stijging in de elektrische geleidbaarheid en dus een daling in de elektrische weerstand. De weerstand R van de fotoweerstand daalt bij stijgend vermogen P_D van het invallend licht. Het verband is sterk niet-lineair en wordt derhalve het best logaritmisches weergegeven (zie figuur 2.65.a):

$$\log_{10} R = a - b \log_{10} P_D$$



Figuur 2.65: a) Weerstand van Cadmiumsulfide i.f.v. invallend lichtvermogen en b) spectrale responscurves voor enkele fotoweerstanden.

Figuur 2.65.b toont de spectrale responscurve $D(\lambda)$ voor drie gebruikelijke fotoweerstanden. Cadmiumsulfide (CdS) heeft een piekgolflengte $\lambda_p \approx 0,6 \mu\text{m}$ en is dus geschikt voor meting van zichtbaar licht. Loodsulfide (PbS) met $\lambda_p \approx 3,0 \mu\text{m}$ en indiumantimoon (InSb) met $\lambda_p \approx 5,3 \mu\text{m}$, zijn geschikt voor meting van infrarood straling. Typische waarden voor een indiumantimoon fotodetector met afmetingen $6,0 \times 0,5 \text{ mm}$ zijn (gevoeligheid) $K = 7 \text{ V/mW}$ en (tijdconst) $\tau = 5 \mu\text{s}$. Fotoweerstanden moeten in een meetbrug geplaatst worden om een spanningsuitgangssignaal te bekomen.

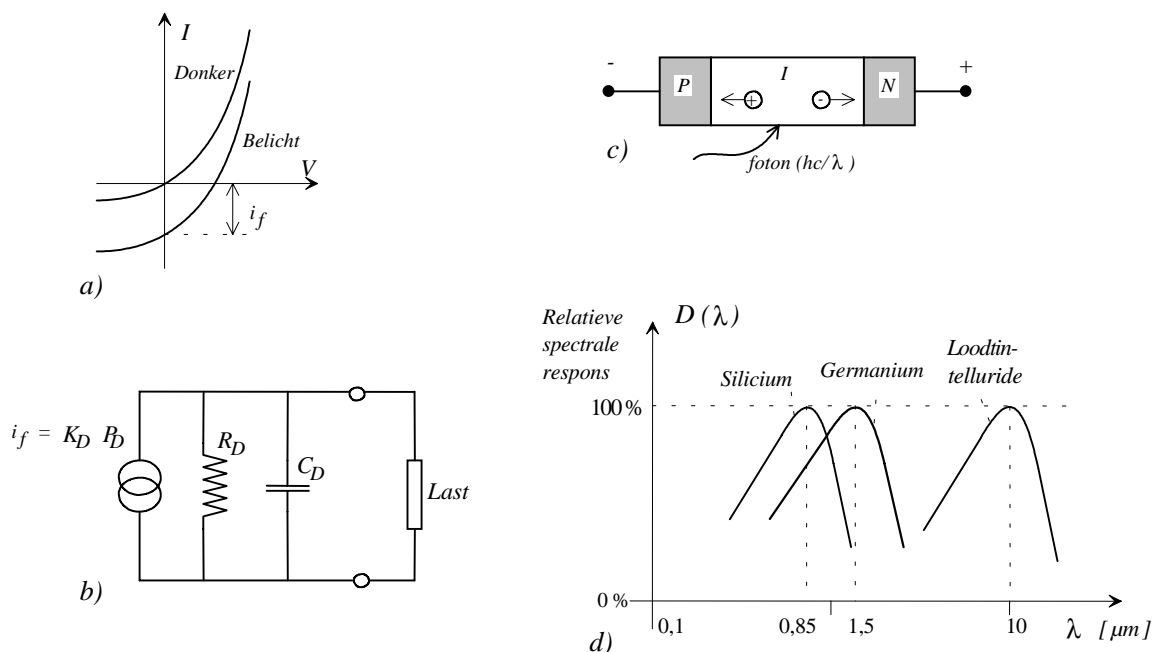
Fotovoltaïsche detectors

Fotovoltaïsche detectors zijn fotodiodes die opgebouwd worden uit P- en N-type gedopeerd halfgeleidermateriaal. Figuur 2.66.a toont een typische stroom-spanningkarakteristiek voor een fotodiode in donkere of belichte toestand. Ten gevolge van het invallend licht verschuift de volledige karakteristiek naar beneden ter waarde van de fotostroom i_f . De fotostroom is evenredig met het vermogen van het invallend licht P_D opgenomen door de detector:

$$i_f = K_D P_D$$

waarbij K_D [A/W] de gevoeligheid is [Eng.: sensitivity of responsivity].

Een (Norton) equivalent schema voor dit type detectors is een stroombron in parallel met de diodeweerstand R_D en diodecapaciteit C_D , zoals voorgesteld in figuur 2.66.b. Loodtintelluride is een voorbeeld van een infrarood fotodetector. Deze legering heeft bij 77 K een gevoeligheid K_D gelijk aan 5 A/W en een spectrale respons $D(\lambda)$ tussen $7 \mu\text{m}$ en $14 \mu\text{m}$ met een piek in de buurt van $10 \mu\text{m}$ (figuur 2.66.d).

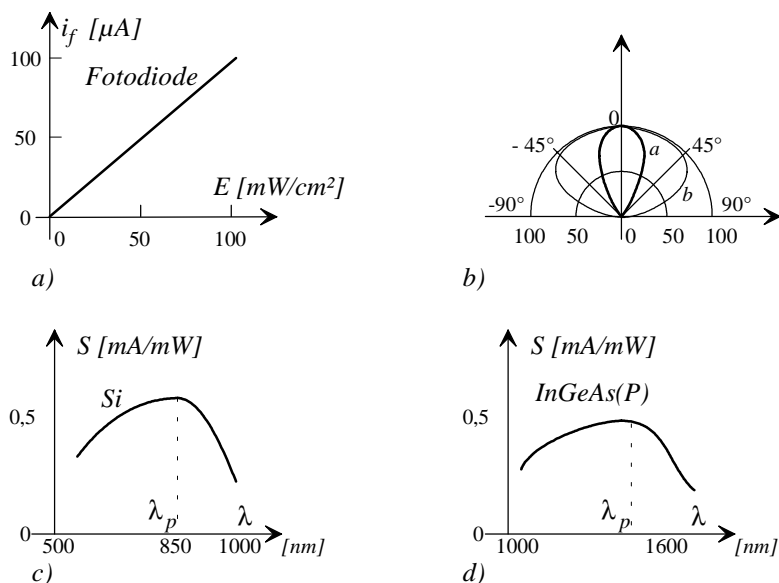


Figuur 2.66: a) Stroom-spanningkarakteristiek van fotodiode, b) Norton equivalente schakeling voor fotodiode, c) opbouw van een PIN-fotodiode en d) spectrale responscurven van enkele fotovoltaïsche detectors.

Figuur 2.66.c toont de opbouw van een PIN-diode. De PIN-diode heeft een laag ongedopeerd (intrinsiek) I - materiaal tussen de P- en N-lagen. Invallende fotonen creëren additionele elektron-gat paren in dit gebied wat een verhoging van de fotostroom en de gevoeligheid vergeleken met de PN-diode tot gevolg heeft. Een gebruikelijke PIN-diode heeft een actief gebied van 1 mm^2 , een gevoeligheid $K_D \approx 0,55 \text{ A/W}$, een piekgolflengte $\approx 0,85 \text{ }\mu\text{m}$ en een spectrale responscurve zoals weergegeven in figuur 2.66.d. De spectrale respons van deze fotodiode stemt goed overeen met spectrale radiantie $S(\lambda)$ van GaAlAs LED of ILD bronnen. Door hun kleine afmetingen zijn ze zeer goed geschikt voor koppeling met optische vezels. De Germanium PIN-diodes met $K_D \approx 0,5 \text{ A/W}$ en $\lambda_p \approx 1,5 \text{ }\mu\text{m}$ zijn meer geschikt voor toepassingen met lange golflengtes.

De principiële werking van een 'avalanche' fotodiode verschilt van de werking van de PIN-diode in één belangrijk opzicht: Waar bij een PIN-diode één foton één elektron opwekt, zal bij een avalanche fotodiode een vermenigvuldiging optreden welke resulteert in vele elektronen aan de uitgang voor elk invallend foton.

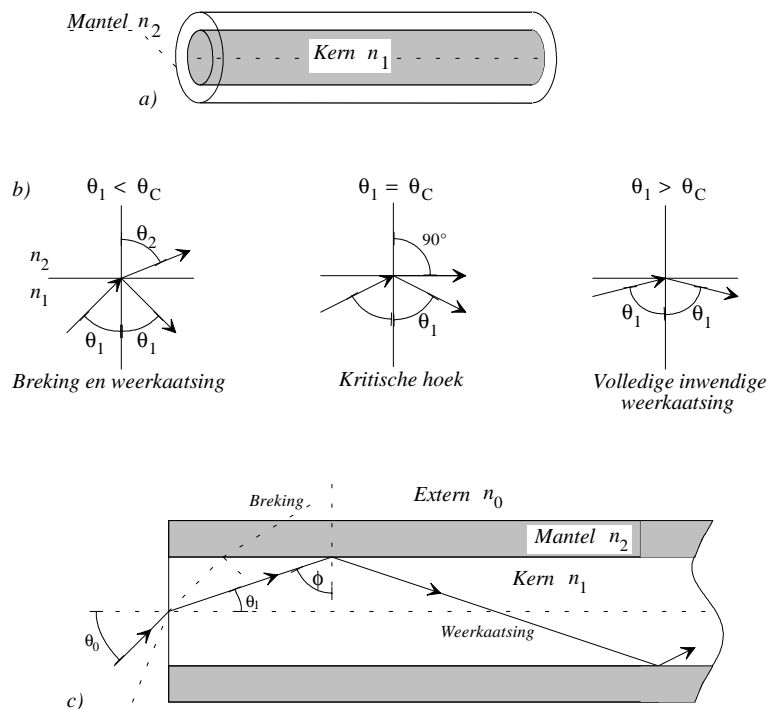
Figuur 2.67 toont enige karakteristieken van fotodiodes. In het stralingsdiagram van figuur 2.67.b geldt curve *a* voor een diode met lens en curve *b* voor een diode zonder lens. De halfwaardehoeken liggen tussen 10 en 60 graden.



Figuur 2.67: a) Overdracht karakteristiek en b) richtingsdiagram van een fotodiode. c) en d) Spectrale gevoeligheid van siliciumdiode respectievelijk germaniumarsenidediode.

10.4 Transmissiemedium: optische vezels

Een vaak (o.a. voor transport) gebruikt transmissiemedium zijn optische vezels. Een typische optische vezel bestaat uit twee cilinders zoals weergegeven in figuur 2.68.a. De binnenste cilinder of kern (Eng.: core) heeft een brekingsindex n_1 . De buitenste cilinder of mantel (Eng.: cladding) heeft een brekingsindex $n_2 < n_1$.



Figuur 2.68: Principe van optische vezels: a) opbouw, b) weerkaatsing en breking van licht bij een grens tussen twee materialen en c) totale interne reflectie of verliesloos lichttransport bij optische vezels.

We zullen nu de hoek berekenen waaronder het licht moet invallen zodanig dat het volledig geleid wordt door de vezel. Een lichtstraal invallend op het scheidingsoppervlak tussen twee mediums met verschillende brekingsindices wordt voor een deel gereflecteerd en voor een deel gebroken zoals figuur 2.68.b weergeeft. De brekingshoek θ_2 wordt bepaald door:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

Omdat $n_1 > n_2$, is $\theta_2 > \theta_1$.

Voor een bepaalde hoek, de kritische hoek θ_c genoemd, wordt $\theta_2 = 90^\circ$.

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \quad \text{of} \quad \theta_c = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

Wanneer $\theta_1 > \theta_c$ wordt al het licht gereflecteerd. Een optische vezel vervoert dus alle stralen met een invalshoek groter dan de kritische hoek, door een aantal interne reflecties. Als θ_0 de hoek is

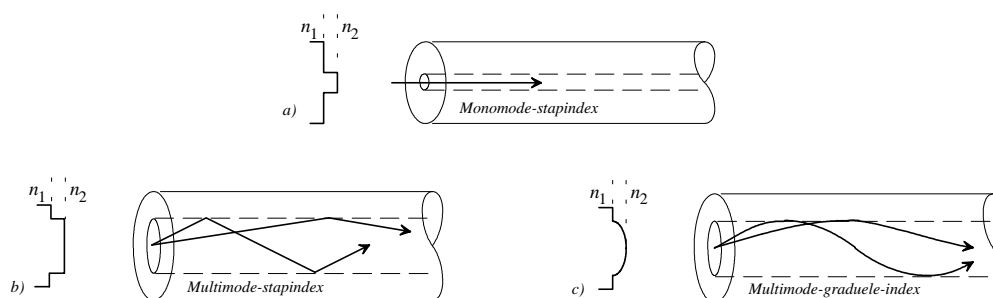
waarmee het licht invalt op de vezel (zie figuur 2.68.c), dan is θ_1 , de hoek waarmee de straal de kern binnenkomt, gelijk aan:

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta_1 = n_1 \cos \phi \quad \text{met } n_0 = 1 \text{ voor lucht.}$$

De totale interne reflectie treedt dus op als:

$$\phi \geq \theta_C \text{ of } \sin \phi \geq \frac{n_2}{n_1} \text{ of } \sin \theta_1 = \cos \phi \leq \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} \text{ of } \sin \theta_0 \leq \frac{n_1}{n_0} \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}$$

Dit definieert de aanvaarde kegel van invallend licht.



Figuur 2.69: Indexprofiel en voortplantingspad van het licht voor verschillende typen optische vezels.

Figuur 2.69.a toont drie gebruikelijke soorten van optische vezels. De *monomode-stapindex-vezel* heeft een zeer smalle kern van enkele μm diameter. Dit type optische vezel kan slechts één voortplantingsmode verzorgen en vergt een coherente laser als bron. De *multimode-stapindex-vezel* bezit een veel grotere kern van ongeveer $50 \mu\text{m}$ in diameter (of meer). Verschillende golven kunnen zich voortplanten in multimode vezels. Omdat de kern een veel grotere diameter heeft, is de plaatsing van de vezel t.o.v. de bron minder kritisch (betere lichtopvangst) en kunnen de vezels gemakkelijker met elkaar verbonden worden. Multimode vezels zijn in tegenstelling tot de monomode vezels, geschikt voor gebruik met LED's. De kern van de *multimode-graduele-index vezel* heeft een niet-uniforme brekingsindex. n neemt parabolisch af van een waarde n_1 op de centrale as naar n_2 op de grens tussen kern en mantel. Het voortplantingspad van de lichtgolven is bij deze optische vezels gebogen, hetgeen voordelig is. Maar de vezel is wel veel duurder dan de stapindex vezel. Een typische waarde voor de buiten diameter van de mantel (voor alle typen) is $125 \mu\text{m}$.

Tenslotte valt op te merken dat ook het transmissiemedium een golflengte gevoelige respons $M(\lambda)$ bezit. Deze moet natuurlijk afgestemd zijn op de spectrale radiantie $S(\lambda)$ van de bron en de spectrale gevoeligheid $D(\lambda)$ van de detector.

10.5 Intensiteitsmeting

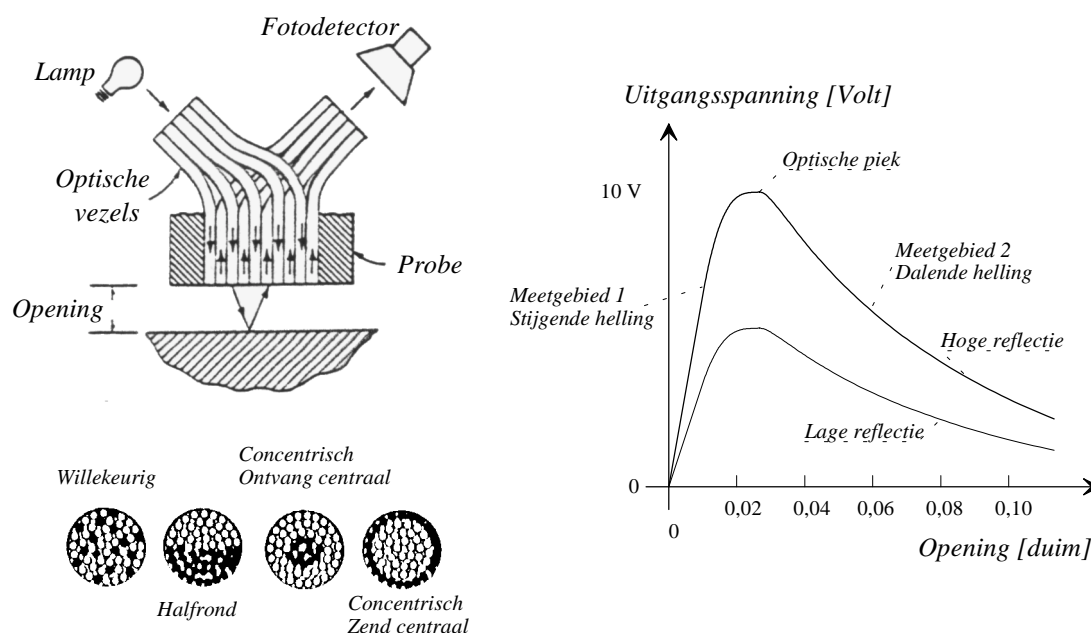
Een optisch meetsysteem kan gebaseerd worden op een intensiteitsmeting van het door een bron uitgestraald en vervolgens al dan niet via weerkaatsing opgenomen licht. Het meetsysteem uit figuur 2.70 bestaat uit een aantal optische vezels welke het licht van de bron naar het meetobject leiden en een aantal vezels welke het weerkaatste licht naar de detector voeren. Deze sensoren worden gebruikt om verplaatsingen te meten in het gebied van $1/10 \mu\text{m}$ tot een paar mm.

De bijbehorende elektronica zorgt dan voor een DC uitgangsspanning die evenredig is met de afstand tussen probe en object.

De verklaring van het verloop van de uitgangsspanning in functie van de afstand, zoals weergegeven door figuur 2.70 luidt als volgt: Is er geen opening dan kan er geen licht ontsnappen uit de probetip en is de uitgangsspanning gelijk aan nul. Vergroot de opening dan wordt er meer en meer van het oppervlak verlicht en de hoeveelheid weerkaatst licht verhoogt. Dit is een zeer gevoelig en ongeveer lineair meetgebied. Wordt de opening nog groter dan zal op een bepaald moment het volledig oppervlak verlicht worden. Dit komt overeen met een maximale waarde van de uitgangsspanning. Daarna gaat een vergroting van de opening overeenkomen met een vermindering van de uitgangsspanning, want de verlichting van het object vermindert, het aandeel van het gereflecteerde licht opgevangen door de sensor vermindert. Dit gebied kan ook gebruikt worden om te meten maar is minder gevoelig (kleinere helling) en minder lineair. Er zijn dus twee mogelijke meetgebieden.

De gevoeligheid van de sensor is ook sterk afhankelijk van de reflectie-eigenschappen van het object dat meestal een machineonderdeel is. De sensor moet derhalve gekalibreerd worden voor dat specifieke oppervlak vooraleer met de metingen te starten.

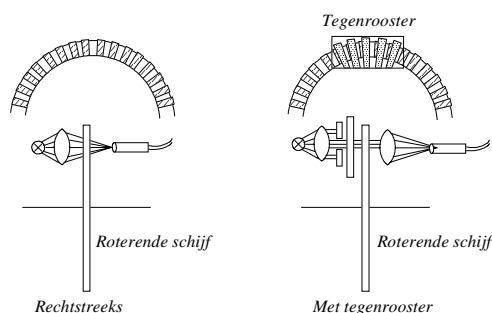
Er zijn verschillende mogelijke schikkingen van de 'transmitting' en 'receiving' optische vezels. De willekeurige (Eng.: random) verdeling geeft de beste gevoeligheid en is ook eenvoudiger te fabriceren. Daarom wordt meestal deze verdeling gebruikt.



Figuur 2.70: Optisch meetsysteem via intensiteitsmeting.

10.6 Incrementele optische encoder

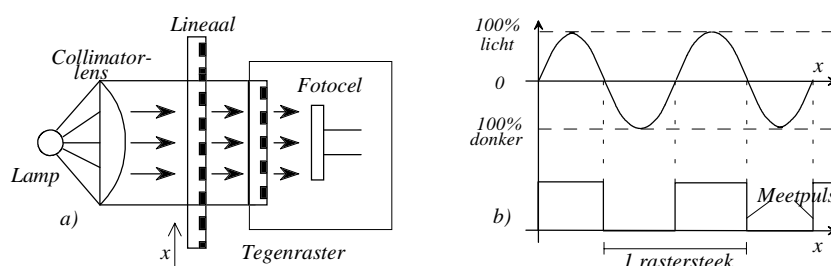
Dit meetsysteem bestaat uit een schijf (roterend) of meetlat (translerend) met opeenvolgende doorschijnende en niet-doorschijnende strepen. De onderverdeling kan gaan tot 5000 per omwenteling. Deze schijven worden afgetast met fotocellen, ofwel *rechtstreeks* ofwel door middel van een *tegenrooster*. Bij rechtstreekse aftasting krijgt de optische opnemer alleen licht van één doorschijnende zone. Bij gebruik van een tegenrooster draait de schijf voor een rooster dat dezelfde indeling in doorschijnende en donkere zones als de schijf bezit. Bij iedere overgang van een volledig donkere naar een volledig doorschijnende zone komt het licht van meerdere rastersteken op de fotocel terecht, hetgeen de gevoeligheid aanzienlijk verhoogt. Zie figuur 2.71.



Figuur 2.71: Aftasting bij roterend optisch meten.

Figuur 2.72.a toont het *principe* van een optisch meetsysteem, met een digitaal-incrementeel uitgangssignaal. Een glazen liniaal is voorzien van een licht-donker raster. In de meetkop bevindt zich aan de ene zijde een lichtbron, die via een collimatorlens een evenwijdige lichtbundel door de liniaal zendt. Het raster van de liniaal wordt afgebeeld op een tegenrooster met gelijke rastersteek, dat zich eveneens in de meetkop bevindt. Het licht dat door beide rasters valt wordt gedetecteerd door een fotocel. Indien de meetkop zich langs de liniaal beweegt, zullen de donkere strepen van beide rasters afwisselend het licht doorlaten en tegenhouden.

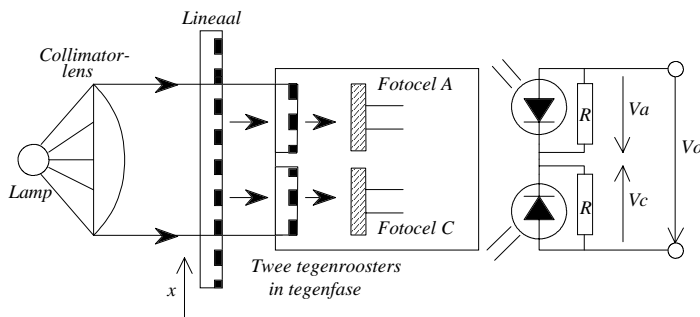
Figuur 2.72.b toont het driehoekig signaal dat de fotocel daarbij uitgeeft. De positie volgt uit het tellen van de (elektronisch gegenereerde) nuldoorgangspulsen.



Figuur 2.72: a) Werkingsprincipe met tegenrooster en b) bijbehorend uitgangssignaal.

Het analoge signaal van de fotocel kan *drift* vertonen, waardoor meetfouten ontstaan. Deze drift ontstaat door:

- variaties in het lichtpad (lichtopbrengst lamp, lokale vervuiling van de liniaal).
- drift in de gevoeligheid van de fotocellen.
- drift in de analoge elektronica voor de signaalverwerking.



Figuur 2.73: Driftcompensatie met twee tegenroosters in tegenfase.

Het effect hiervan kan worden gecorrigeerd door twee tegenroosters in tegenfase toe te passen zoals weergegeven in figuur 2.73. De uitgangssignalen van de fotocellen A en C zijn op ieder ogenblik gelijk in grootte maar tegengesteld in teken. In de schakeling rechts in de figuur worden de signalen van elkaar afgetrokken met als resulterende uitgangsspanning:

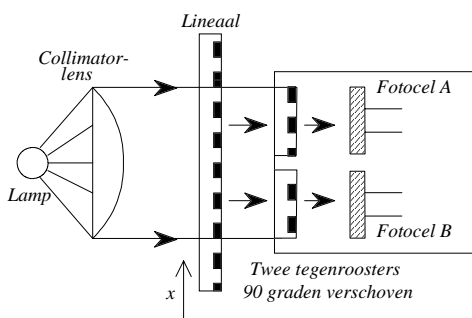
$$V_0 = V_A - (-V_C)$$

Indien door één van bovengenoemde oorzaken een drift V optreedt zal deze in beide fotocellen gelijk zijn. Het uitgangssignaal van de schakeling wordt nu:

$$V_0 = (V_A + V) - (-V_C + V) = V_A + V_C$$

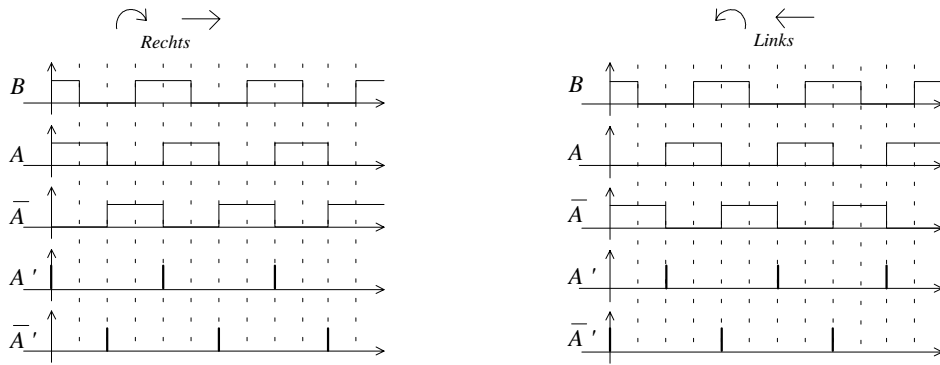
waarmee de drift gecompenseerd is.

Tenslotte rest het probleem van de *richtingsdetectie*. Het digitaal-incrementeel meetsignaal van figuur 2.72.b bevat immers nog geen richtingsinformatie. Bij incrementele opnemers worden daarom twee fotocellen geplaatst welke elektrisch 90° t.o.v. elkaar verschoven zijn, zoals figuur 2.74 aangeeft. Bij een verdraaiing of verplaatsing naar één richting, respectievelijk naar de tegenovergestelde richting, bekomen we de signalen uit figuur 2.75.

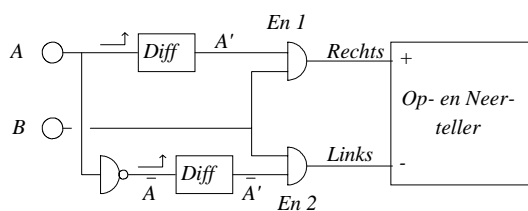


Figuur 2.74: Richtingsdetectie door twee tegenroosters 90° verschoven.

De incrementele opnemer levert de signalen A en B, welke 90° verschoven zijn t.o.v. elkaar. B is voorijlend bij beweging naar rechts, A is voorijlend bij beweging naar links. De logische schakeling uit figuur 2.76 zal vanuit deze signalen, twee signalen genereren welke voorkomen afhankelijk van de bewegingsrichting. Het 'DIF'-blokje stelt hier een differentiator voor die enkel reageert op de overgang van laag naar hoog (stijgende flank).



Figuur 2.75: Richtingsgevoelige signalen.

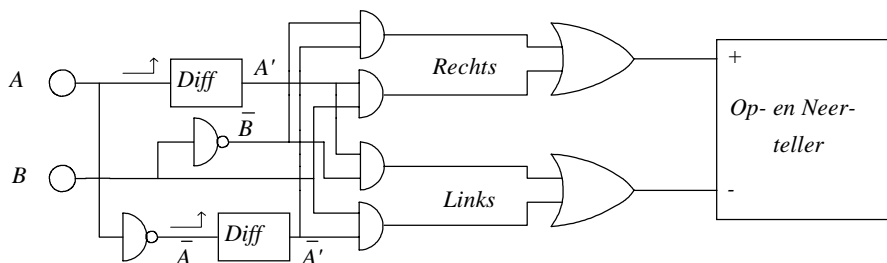


Figuur 2.76: Richtingsgevoelige schakeling.

Bij een beweging naar rechts valt A' samen met het hoog zijn van B. De EN-poort 1 zal de gedifferentieerde impulsen (A') doorsturen op de uitgang RECHTS. De elektronische teller telt op. Bij de beweging naar links valt niet-A' samen met het hoog zijn van B, de EN-poort 2 zal de pulsen niet-A' doorsturen op de uitgang LINKS. De elektronische teller telt af.

Resolutie

Een juiste combinatie van de meetsignalen levert een 2-voud en zelfs een 4-voud van de opnemerfrequentie op. Bij een meetopnemer met 500 incrementen per omwenteling, zijn zo tot 2000 RECHTS/LINKS-pulsen/omwenteling mogelijk. Het schema uit figuur 2.77 levert een dubbele nauwkeurigheid of een dubbele frequentie.

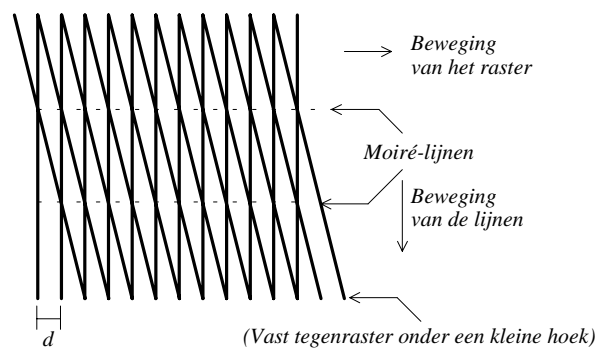


Figuur 2.77: Richtingsgevoelige schakeling op dubbele frequentie.

Bij een gewenste resolutie van 1 µm moet volgens bovenstaande techniek de rastersteek 4 µm bedragen. Dit is optisch niet haalbaar. De meeste optische rasters die worden toegepast in meetsystemen voor produktiemachines hebben een rastersteek van 40 µm. Soms komt 20 µm of zelfs 10 µm voor. Om toch tot de gewenste resolutie te komen zal het analoge uitgangssignaal

moeten worden geïnterpoleerd. In de praktijk wordt 5-, 10- of 25-voudig geïnterpoleerd. De uiteindelijke resolutie van het meetsysteem wordt dus bepaald door de toegepaste rastersteek en de interpolatiefactor.

Een tweede mogelijkheid bij translerende systemen voor het creëren van heldere en donkere zones berust op het *Moiré-effect*. Door een tegenrooster met gelijke verdeling als de lat onder een kleine hoek te plaatsen t.o.v. de strepen op de lat, ontstaan horizontaal donkere en heldere zones zoals aangegeven in figuur 2.78. Verplaatst de lat zich naar rechts, dan lopen deze donkere zones van boven naar beneden. Bij verplaatsing naar links lopen de zones van onder naar boven. De afstand tussen de zones is afhankelijk van de gebruikte hoek. Richtingsdetectie gebeurt weer met 2 fotocellen, op 90° of $1/4$ van een periode van elkaar.



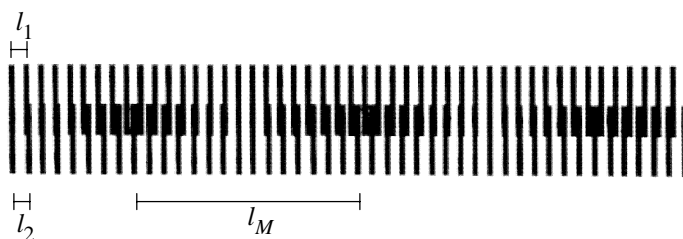
Figuur 2.78: Het ontstaan van Moiré-lijnen door het kruisen van rasters.

Door een juiste keuze van de hoek, kan een aanzienlijke resolutieverhoging bekomen worden. Bij een verplaatsing van de lat over één rastersteek zullen de Moiré-lijnen over een (veel) grotere afstand (gelijk aan de afstand tussen de Moiré-lijnen) verschuiven.

Ook de opstelling uit figuur 2.79 maakt een gelijkaardige resolutieverhoging mogelijk. Twee encoders met een klein verschil in steek worden achter elkaar geplaatst.

De geometrische periodiciteit van de banden is het kleinste gemene veelvoud van de afzonderlijke periodiciteiten. Bij kleine verschillen is die ongeveer gelijk aan de oorspronkelijke periodiciteit gedeeld door de relatieve afwijking. Wanneer nu de ene encoderstrip één steek verschuift ten opzichte van de andere, dan verplaatst de band zich ook over een hele periode: de optische verplaatsing is dus vergroot met een factor gelijk aan de inverse van het relatieve verschil.

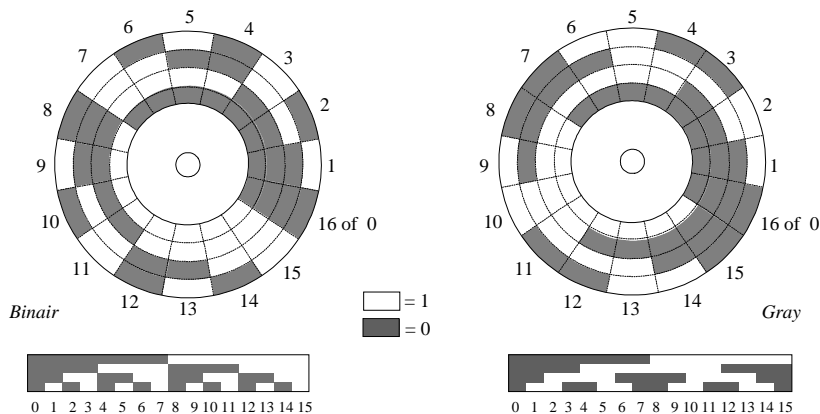
De resolutieverhoging is nu mogelijk door te meten over meerdere sleuven en het meetsignaal te interpoleren. Om een richtingsafhankelijk signaal met een grotere gevoeligheid en bedrijfszekerheid te bekomen, worden ook hier 4 fotocellen geplaatst.



Figuur 2.79: Incrementele encoder met Moiré-effect door verschil in rastersteek.

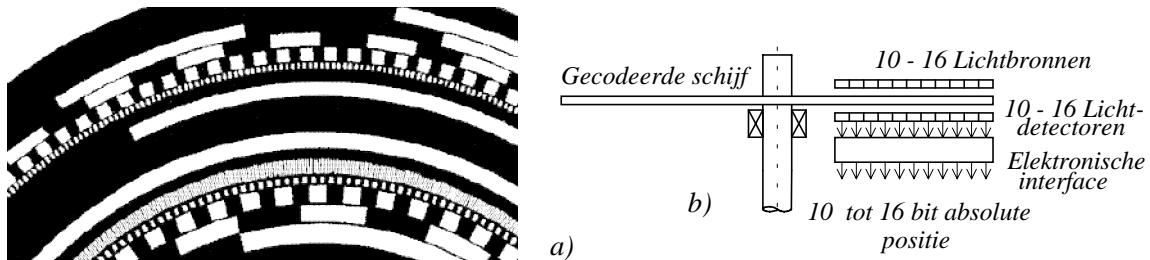
10.7 Absolute optische meetsystemen

De absolute encoders voor rotaties zijn meestal beperkt tot 1 omwenteling. Evenwel is er een één op één verband tussen de positie en de digitale output. De digitale output is als het ware een digitale code van de plaats. Figuur 2.80 geeft enkele voorbeelden van uitvoeringsvormen van plaats- en een hoekverdraaiingsencoders. De uitlezing van de digitale code geschiedt hetzij langs magnetische weg, hetzij langs elektrische weg, hetzij langs optische weg. Bij de elektrische uitlezing geleiden de zones met een logische '1', bij de magnetische methode is de logische '1' uit magnetisch materiaal gemaakt, terwijl voor de optische uitlezing de '1' transparant is.



Figuur 2.80: Absoluut gecodeerde schijven en latten.

Figuur 2.81 geeft nog een voorbeeld van een absolute optische encoder.

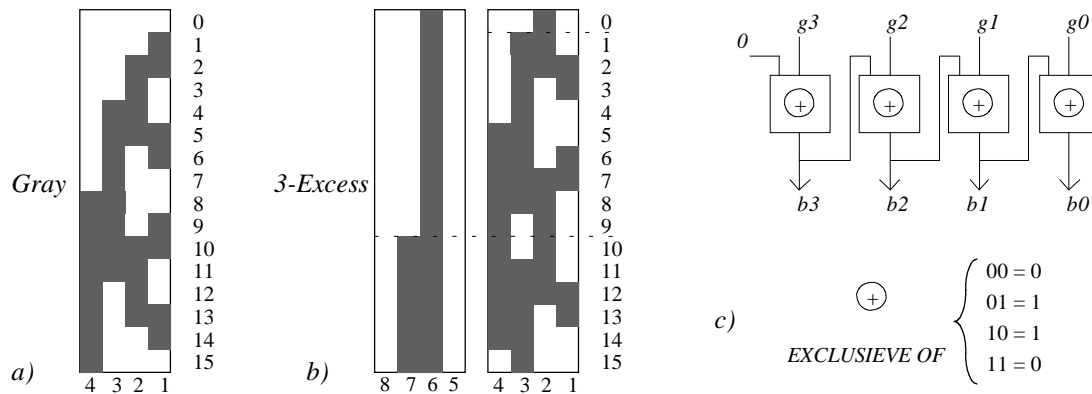


Figuur 2.81: a) Gray gecodeerde schijf voor en b) constructie van absolute optische encoder.

Voor de uitvoering van de figuur 2.80.a werd de binaire code gebruikt, in figuur 2.80.b is de uitvoering een Gray-code. Een nadeel van het gebruik van de *binaire code* is dat in de uitlezing bij een overgang van een positie naar een volgende, meer bits gelijktijdig wijzigen. Bij de overgang van 11 (= 1011) naar 12 (1100) bijvoorbeeld, wijzigen 3 bits. Als de bits niet gelijktijdig wijzigen t.g.v. een slechte uitlezing, of wanneer de encoder stopt tijdens de overgangsfase van een van de bits, dan zullen er fouten optreden. Vandaar de voorkeur voor een encoder waarbij de opeenvolgende plaatsen in de code slechts 1 bit van elkaar verschillen (= progressieve code). De *Gray-code*, weergegeven in figuur 2.80.b voldoet hieraan. De Gray-code is echter geen rekencode zoals de zuivere binaire code, waardoor een code-omvormer noodzakelijk is. Een andere progressieve cyclische code is de *3-excess-code*. Een binair getal van 4 bits stemt normaal overeen met de cijfers van 0 tot 15. Indien nu voor de voorstelling van 10 cijfers (0 - 9) 4-bits gebruikt worden, zoals in de BCD-code, bestaat de mogelijkheid 6 combinaties te laten wegvallen. Dit geschiedt in de "overschot van 3 code" door de eerste drie en de laatste drie cijfers weg te halen. Zo laat de 3-excess-code gebaseerd op de Gray-code per

decade de eerste drie en de laatste drie mogelijkheden weg uit de Gray-code. Figuur 2.82 laat de Gray-code en de 3-excess-code zien. De 3-excess-code heeft de volgende voordelen:

- 'nul' wordt nu 0010: dit is een eenduidig binair getal en kan niet verward worden met het ontbreken van informatie.
- de code is beperkt redundant, de zes niet gebruikte cijfers kunnen dienen om een beveiliging uit te voeren.



Figuur 2.82: a) Gray-code, b) 3-excess-code en c) omzetting van Gray naar binaire code.

Zoals eerder vermeld heeft de Gray-code als nadeel dat ze geen rekencode is. Het omzetten naar een zuivere binaire code is echter niet moeilijk. Stellen we een 4-bit Gray-code voor door $g_3g_2g_1g_0$ en de overeenkomende binaire code door $b_3b_2b_1b_0$ dan is de binaire code te bekomen door volgende bewerkingen:

$$g_3 \oplus 0 = b_3, \quad g_2 \oplus b_3 = b_2, \quad g_1 \oplus b_2 = b_1, \quad g_0 \oplus b_1 = b_0$$

Algemeen geeft dit:

$$b_n = g_n \oplus 0 \quad \text{en} \quad b_k = g_k \oplus b_{k+1} \quad (\text{met } k = n-1, \dots, 1, 0)$$

Dit leidt tot het logisch schema uit figuur 2.82.c.

Voorbeeld:

	g_3	g_2	g_1	g_0	
	1	0	1	0	
	0	1	1	0	
\oplus					
	1	1	0	0	
	b_3	b_2	b_1	b_0	

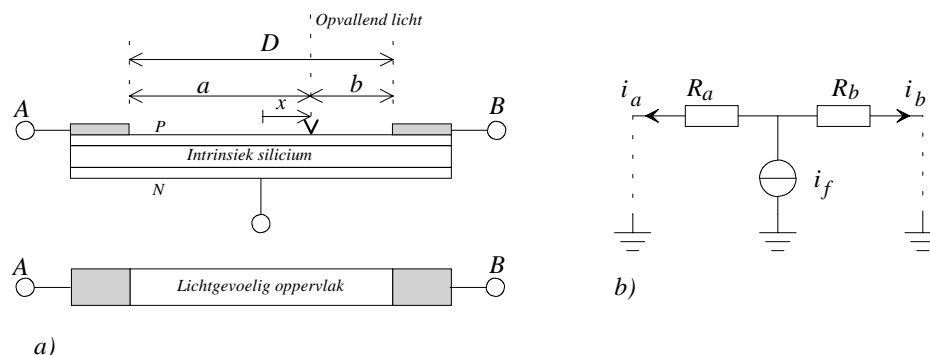
Omgekeerd volgt de Gray-code uit de binaire code door toepassing van een exclusieve OF-bewerking (bit per bit) op het binair getal en het over één plaats naar rechts verschoven binair getal.

Voorbeeld:

	0	1	0	0	0	
	0	0	1	0	0	0
\oplus						
	0	1	1	0	0	
						(Gray) $b_k \oplus b_{k+1} = g_k$

10.8 PSD (Eng.: Position Sensitive Detector)

Een PSD is een lichtgevoelige halfgeleiderdiode. De positiegevoelige detector (Eng.: PSD = Position Sensitive Detector; ook wel Position Sensitive Diode of Position Sensitive Device) levert een analogoë uitgangssignaal waaruit de plaats van een erop vallende lichtbundel kan worden berekend. Figuur 2.83.a toont schematisch de opbouw van de PSD.



Figuur 2.83: a) Principe en b) elektrisch equivalent model van een PSD.

In de ééndimensionale configuratie bestaat een PSD uit een rechthoekige (bv. 30 x 2 mm²) PN-diode of PIN-diode zoals figuur 2.83.a weergeeft. Het N⁺-silicium aan de achterzijde is gemetalliseerd en vormt de tegenelektrode. Het P-silicium aan de voorkant vormt het lichtgevoelige oppervlak en heeft twee contacten A en B. Een invallende lichtstraal genereert een fotostroom in de PIN-diode of in een PN-diode die in sperrichting staat ingesteld (waardoor de depletielaag of het verarmingsgebied ontstaan is). De fotostroom is evenredig met de intensiteit van het invallende licht. Deze stroom splitst zich in twee stromen i_a en i_b naar de contacten A en B. Volgens het equivalent elektrisch model uit figuur 2.83.b geeft dit:

$$\frac{i_a}{i_b} = \frac{R_b}{R_a} \quad \text{of} \quad i_a R_a = i_b R_b = i_f \frac{R_a R_b}{R}$$

De PSD is zodanig geconstrueerd dat deze een zeer constante oppervlakteweerstand heeft. Hierdoor zijn de weerstanden R_a en R_b :

$$R_a = R(0,5D + x)/D$$

$$R_b = R(0,5D - x)/D$$

waarin R , de totale weerstandswaarde tussen de beide uiteinden, D de afstand tussen de eindcontacten, en $x = 0$ de middenpositie is. Het verschil van beide stromen wordt dan:

$$i_b - i_a = \frac{2i_f}{D}x$$

en is lineair afhankelijk van de plaats x , maar ook evenredig met de intensiteit. De som van beide stromen is gelijk aan de totale fotostroom ($i_a + i_b = i_f$) en is dus (enkel) evenredig met de intensiteit van het invallende licht.

Het quotiënt van verschil- en somstroom hangt slechts af van de positie x van de invallende lichtstraal:

$$\frac{i_b - i_a}{i_b + i_a} = \frac{2}{D}x$$

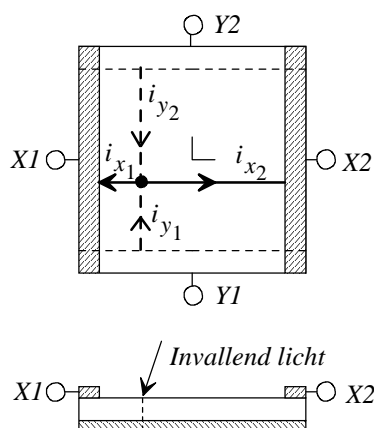
Een PSD vereist dus uitleeselektronica waarmee dit quotiënt kan worden gevormd.

De lichtbundel heeft een zekere diameter. De output van de PSD representeert het zwaartepunt van de bundel. De spectrale responsie van een PSD ligt tussen 400 nm en 1000 nm met een piek rond 900 nm. De gevoeligheid ligt rond 0,6 A/Watt. De lineariteit is meestal beter dan één procent, het bereik enige cm.

De *resolutie* die met een PSD bereikt kan worden, wordt bepaald door de ruis in de signalen i_a en i_b . Deze ruis wordt veroorzaakt door:

- de hagelruis in het signaal en de donker-stroom,
- ruis in de weerstanden R_a en R_b ,
- ruis in de meetversterker.

De nauwkeurigheid die bereikt kan worden ligt in de orde van 1:10.000. De invloed van donker-stroom en omgevingslicht kan worden verminderd door gepulseerd licht te gebruiken.



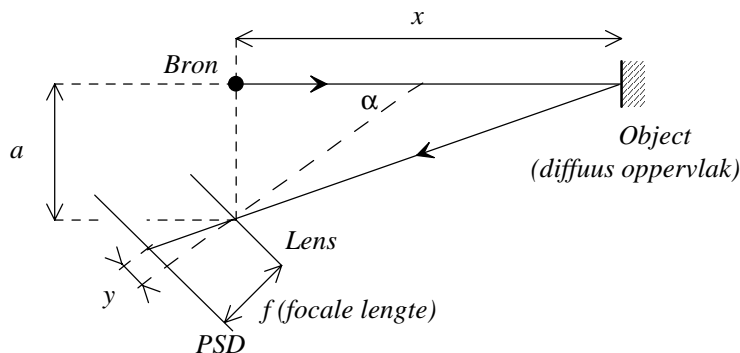
Figuur 2.84: Tweedimensionale PSD: bij gesperde junctie zijn i_x en i_y fotostromen ten gevolge van de lichtvlek ter hoogte van (x,y) .

Bij de *tweedimensionale* uitvoeringen zijn er twee tegenover elkaar liggende elektroden aangebracht: één paar aan de P-zijde en één paar aan de N-zijde. Er is geen gemetalliseerde achterzijde aanwezig. Figuur 2.84 toont een planaire PN-diode met vrij grote afmetingen, enige cm^2 . Het verschil tussen de fotostromen door twee tegenover elkaar liggende aansluitingen, $i_{x1}-i_{x2}$, respectievelijk $i_{y1}-i_{y2}$ is recht evenredig met respectievelijk de x - en de y -positie van een op de diode invallende lichtbundel. Met een dergelijke PSD kan dus de plaats van een lichtbundel in het tweedimensionale vlak worden gemeten. Deze eigenschap maakt het mogelijk verplaatsingen en hoekverdraaiingen te meten.

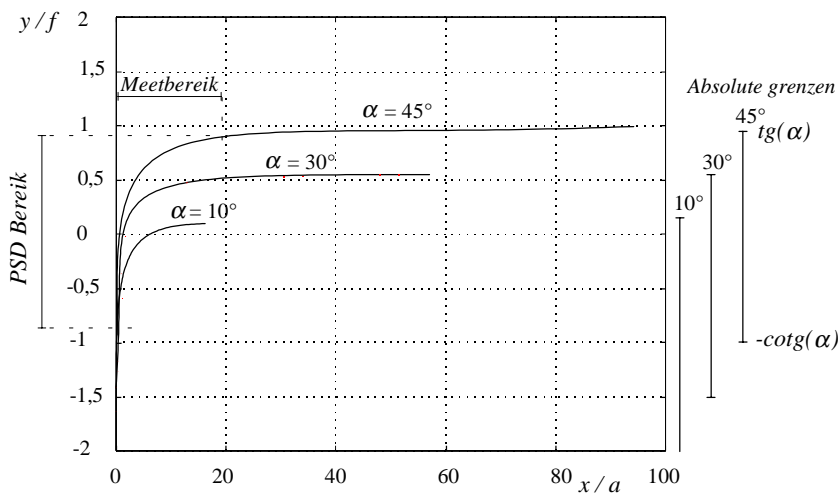
Door de juiste opbouw van 3 tweedimensionale PSD's gecombineerd met drie laserdiodes in een deels vervormbaar huis, worden bijvoorbeeld krachtsensoren of professionele 'joysticks' of 'space mouses' gemaakt. Hierbij wordt gebruik gemaakt van triangulatietechnieken, waarvan een voorbeeld in de volgende paragraaf.

10.9 Triangulatie met PSD

Via optische projectie en triangulatie is een afstandsmeting met een PSD mogelijk. Figuur 2.85 geeft de opstelling schematisch weer.



Figuur 2.85: Triangulatie met PSD.



Figuur 2.86: Verband tussen te meten afstand en positie van de lichtstip op de PSD, bij wijze van voorbeeld zijn mogelijk PSD en meetbereik aangegeven.

De relatie tussen de afstand x en de positie y van de lichtvlek op de PSD is niet-lineair, en afhankelijk van een aantal geometrische parameters:

$$x = a \frac{y \cdot \text{tg} \alpha + f}{f \cdot \text{tg} \alpha - y}$$

Door de keuze van α , a en f kan voor een bepaalde toepassing een compromis worden gevonden tussen bereik en niet-lineariteit. Alhoewel niet-lineariteit op zich geen probleem hoeft te zijn, beperkt ze het bereik tengevolge van onnauwkeurigheid in de verwerkingselektronica. Uit figuur 2.86 is af te leiden dat een fout Δy in de positie op de PSD, een grotere invloed heeft op de meetonnauwkeurigheid Δx naarmate de differentiële gevoeligheid kleiner is. De afstandsmet-systemen op basis van een PSD in de handel hebben een bereik van enkele cm tot enige m. De onnauwkeurigheid hangt sterk af van de lineariteit van de PSD, maar ook van de kwaliteit van de verwerkingselektronica. Het gebruik van gemoduleerd licht is vrijwel altijd noodzakelijk, om invloeden van omgevingslicht uit te sluiten.

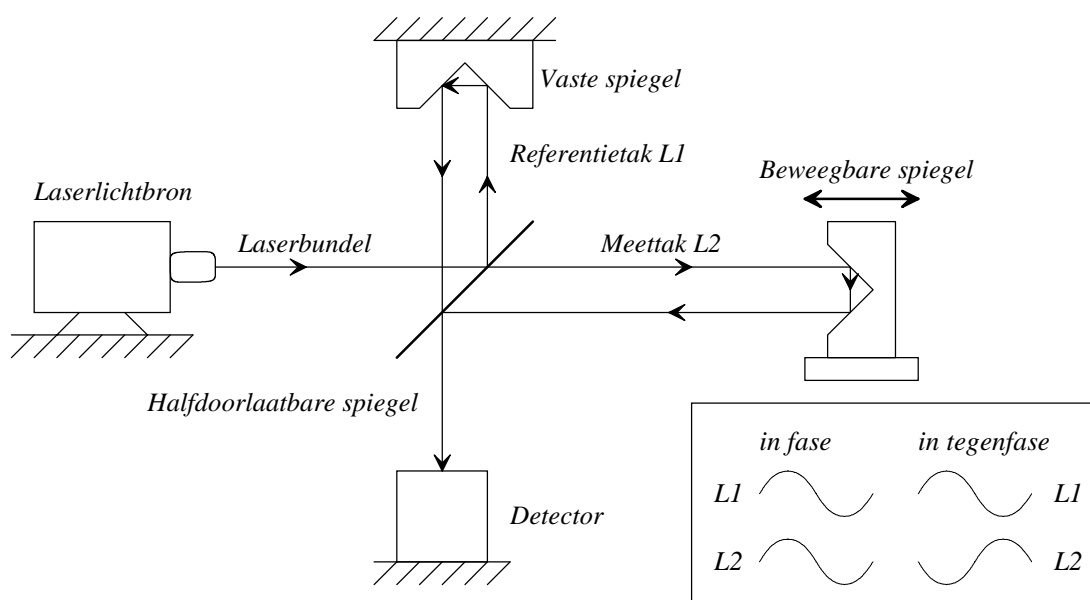
10.10 Lasersensoren

Interferometer

Figuur 2.87 toont het principe van Michelson voor interferometrie: het licht van een laserlichtbron wordt door de halfdoorlaatbare spiegel deels afgebogen en gericht op een vaste spiegel (de referentietak, L_1), deels doorgelaten en op een beweegbare spiegel geworpen (de meettak, L_2). Het teruggekaatste licht in de referentie- en meettak wordt via de halfdoorlaatbare spiegel samengebracht in een detector. Indien de beweegbare spiegel wordt verplaatst, verandert de lengte van het lichtpad in L_2 . Hierdoor zullen de lichtbundels L_1 en L_2 elkaar afwisselend versterken (in fase) en verzwakken (uit fase). De afstand tussen twee interferentieperioden is gelijk aan de golflengte van het gebruikte licht, λ , en komt overeen met een verplaatsing van de beweegbare spiegel van $\lambda/2$.

De golflengte van het gebruikte licht vormt hier dus de meetstandaard. Dit principe werkt alleen goed indien licht met één golflengte wordt gebruikt. Als lichtbron wordt daarom een laser genomen, die monochroom en coherent licht produceert. De golflengte van het licht van een Helium-Neon laser is $\lambda = 0,63 \mu\text{m}$. Deze meetstandaard van $0,63/2 \approx 0,3 \mu\text{m}$ vormt de basis voor een positiemeetsysteem met een theoretisch zeer hoge resolutie en nauwkeurigheid.

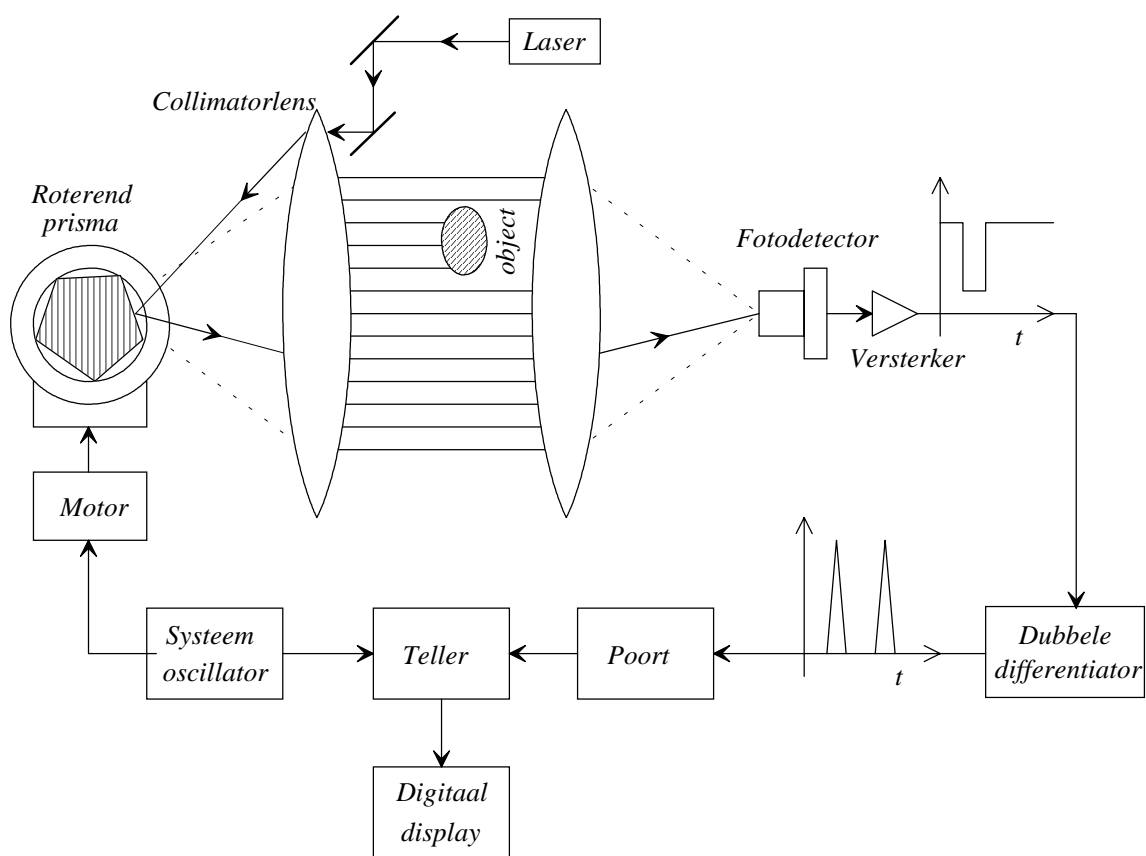
De voortplantingssnelheid van het laserlicht in lucht is echter afhankelijk van de temperatuur, druk en vochtigheid van de lucht. Indien hiervoor wordt gecompenseerd kan een laserinterferometer in een fabrieksomgeving een nauwkeurigheid van 0,5 tot 1,0 μm per meter meetlengte halen, bij een resolutie van 0,1 μm . Er is slechts één fabrikant van laserinterferometers (Hewlett-Packard) en het meetsysteem is zo duur, dat het behalve in nauwkeurige meetmachines alleen wordt toegepast voor kalibratie en keuring van NC-machines.



Figuur 2.87: Laserinterferometrie: het Michelson-principe.

Laser dimensiemeter

Lasers vormen de basis van veel meetsystemen. Een voorbeeld is gegeven in figuur 2.88. Met behulp van een laserstraal wordt een bepaald gebied door een roterend vijfzijdig prisma gescand. De collimatorlens zorgt ervoor dat de stralen evenwijdig zijn. De snelheid waarmee de laserstraal het werkgebied afscaant is evenredig met de hoeksnelheid van het prisma. De schaduw van het object wordt gedetecteerd. De lengte van de schaduw in de tijd is evenredig met de breedte van het object. Het meten van het tijdsinterval is nauwkeuriger door het signaal van de fotocel langs elektronische weg eerst tweemaal te differentiëren. Men krijgt dan als uitgang twee spikes. Door de differentiatie is het systeem minder gevoelig aan wijzigingen in het belichtingsniveau ten gevolge van drift in het laservermogen of aan de vervuiling van de werkomgeving.



Figuur 2.88: Opstelling van laserdimensiemeter.

10.11 Looptijdsensoren

Dit type berust op het meten van de tijd die een golf (hier licht) nodig heeft om de te meten afstand te doorlopen. Meestal zijn bron en ontvanger vast opgesteld tegenover een verplaatsbare reflector. De weg wordt dan twee maal doorlopen, zodat $x = vt/2$, met v de voortplantingsnelheid. Daar licht zich zeer snel voortplant, zijn de looptijden klein: in vacuüm (en lucht) legt het licht 1 meter af in ongeveer 3 ns. Daar de voortplantingssnelheid (via de brekingsindex) varieert met de temperatuur, druk en luchtsamenstelling (in het bijzonder de vochtigheid) is voor zeer hoge nauwkeurigheid compensatie nodig voor deze grootheden.

Commerciële sensoren die gebaseerd zijn op het looptijdprincipe gebruiken halfgeleiderlasers die korte pulsen genereren. Door de grote voortplantingssnelheid is de resolutie beperkt; afhankelijk van de afstand (variërend van enige tientallen cm tot meer dan 10 km) is de resolutie 0.1 tot 1 mm, de onnauwkeurigheid enkele mm tot enkele cm.

10.12 Samenvattende tabel

Volgende tabel geeft een aantal richtwaarden voor de verschillende optische meetsystemen.

Type	Meetbereik (volle schaal)	Gevoeligheid resolutie	T _{max} (°C)
Encoders			
Incr. lineair	1 cm ... 3 m	80 lijnen/mm	80
Incr. angulair	2π	18000 lijnen/2π	80
Abs. lineair	1 cm ... 3 m	1 μm	
Abs. angulair	2π	13 bit	
PSD	5 ... 300 cm	10 μm	50
Interferometer	0 ... 40 m	5 nm	
Looptijd	10 cm - 10 km	3.3 ns/m	50

Tabel 2.7: Optische sensoren.