

De werking van de laser met enkele toepassingen

R. van Beelen T.D. Fysiologie R.U. Leiden
(Bewerkt stageverslag Christiaan Huygensschool Rotterdam)

De term LASER is een afkorting voor Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, ofte wel lichtversterking door gestimuleerde of opgewekte emissie van straling. De laser produceert "licht" met vier zeer belangrijke eigenschappen: smalle frequentieband; grote intensiteit (op een klein oppervlak); fasecoherentie (alle fotonen zijn in fase); directiviteit (puntvormig).

Door deze eigenschappen gaat er een wereld van toepassingsmogelijkheden open, op allerlei verschillende vakgebieden, zoals bijvoorbeeld optisch onderzoek, materiaalbewerking, holografie, afstand/snelheidsmeting, uitlijning, informatie-overdracht, enz. Deze mogelijkheden te samen met de opbouw en de werking worden in grote lijnen in dit artikel beschreven, de één echter iets meer als de ander. Ook de verschillende typen lasers komen aan bod.

Frequentieband

Volgens de theorie van Planck kan een deeltje, dat een zekere energie bezit, op een hoger energieniveau worden gebracht door een uitwendige bron, maar deze toestand is niet stabiel, het deeltje zal na enige tijd spontaan naar zijn oorspronkelijke toestand terugkeren. Deze terugkeer gaat dan gepaard met een energie-afgifte, welke gelijk is aan de opgenomen energie, in de vorm van electromagnetische straling.

Het licht ontstaat op deze manier, doordat een electron in een hogere baan wordt gepompt en daarna terugvalt. De straling die daarbij vrijkomt, heeft een golflengte, welke in het lichtspectrum valt. Elk electron beschrijft, afhankelijk van zijn energie, een bepaalde baan. In die baan is hij in evenwicht, maar hij kan ook hogere banen beschrijven. De energie-afstand tussen de stabiele en onstabiele baan is steeds evenredig met de frequentie van de straling, die optreedt bij het terugvallen van het electron in de stabiele baan. Dit is in een formule eenvoudig voor te stellen als $E = h \times f$. E is de benodigde energiersprong, f is de frequentie en h is de evenredigheidsconstante van Planck ($h=6,625 \cdot 10^{-34}$ Js). Deze formule is het fundament van de laser-theorie. Stel dat het bekend is hoeveel energie er nodig is om een electron van een bepaalde stof in een hogere baan te krijgen, dan kan de frequentie van het uit-

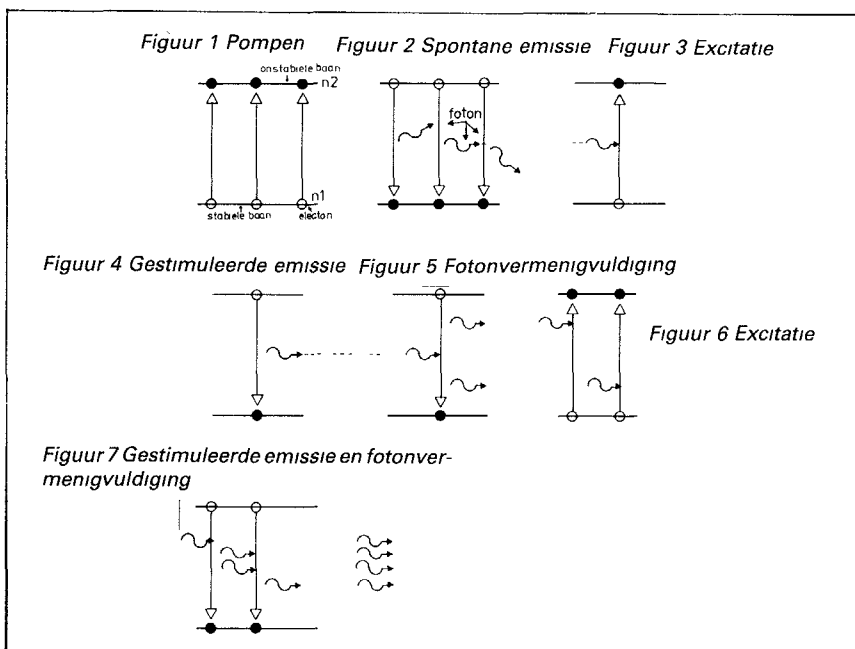
gestraalde licht worden berekend. als $E = 3,14 \times 10^{-19}$ J is, dan is

$$f \frac{3,14 \cdot 10^{-19}}{6,625 \times 10^{-34}} = 4,73 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

Dit komt overeen met een golflengte van 634 nm, wat het oog als rood licht waarneemt. He-Ne-lasers stralen licht uit, welke hier nagenoeg meer overeenkomen. Hoe nu een laser gebruik maakt van dit principe wordt in het hiernavolgende beschreven

Het ontstaan van laser-licht

Stel dat er een groot aantal atomen of moleculen van een zelfde soort zich in een afgesloten ruimte bevinden. Alle zijn in de (stabiele) grondtoestand. Door één of andere vorm van energie toe te voeren, bijvoorbeeld thermische, elektrische of stralingsenergie, wordt een gedeelte van de atomen in een hogere energietoestand gebracht (figuur 1). Dit gebeurt bijvoorbeeld door een flitslamp (robijn-laser; figuur 10) of door elektrische ontlading in een gas (gas-laser; figuur 13) Het toevoeren wordt ook wel pompen (figuur 1) genoemd. Na enige tijd zullen de atomen terugvallen in de grondtoestand (spontane emissie; figuur 2), daarbij emitteren (uitzenden) ze verschillende hoeveelheden energie in de vorm van straling, fotonen genaamd (figuur 2). De straling bestaat echter uit vele frequenties, het deeltje dat recht doorgaat zal een ander electron exciteren (figuur 3) of zal een ander electron dat al op een hoger niveau is, dwingen terug te vallen naar de grondtoestand. Dit wordt gestimuleerde emissie genoemd (figuur 4), het foton wordt hier niet geabsorbeerd, zoals bij excitatie, maar gaat in dezelfde richting door en het electron dat gedwongen werd terug te val-

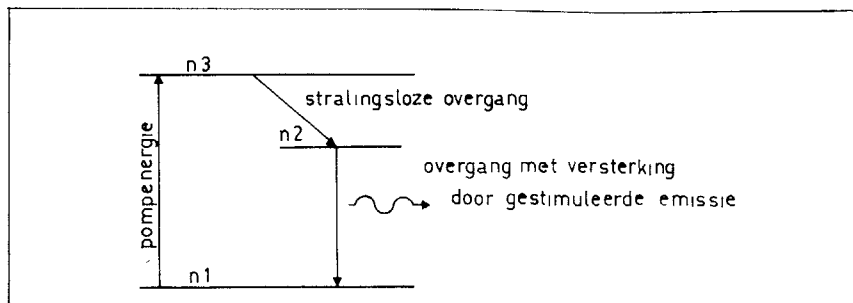


len, zal ook een foton (figuur 5) uitzenden, dat dezelfde frequentie en richting heeft als het foton, welke de aanleiding gaf. Wanneer er van buiten nu onderhouds-excitatie plaatsvindt door bijvoorbeeld te blijven flitsen, zal er constant fotonvermenigvuldiging plaatsvinden, waarvan de frequentie en stralingsrichting hetzelfde blijft (figuur 6 en 7). Het geheel wordt nu nog meer gestimuleerd door de fotonen, die maar één richting hebben, tussen twee spiegels heen en weer te laten kaatsen om de kans te vergroten een nieuw foton te scheppen (figuur 9). Hoe deze spiegels zijn geplaatst wordt verderop beschreven.

Een eis bij dit hele proces is, dat inversie noodzakelijk is om gestimuleerde emissie sterk te laten overheersen. Inversie betekent dat het hogere energieniveau sterker is bezet dan een lager energieniveau. In het optische stralingsgebied kan alleen inversie optreden in een drie-niveausysteem (figuur 8) Zoals te zien is, worden de electronen naar een derde niveau opgepompt. Het terugvallen van de electronen zal niet rechtstreeks gaan van N3 naar N1 (deze overgang wordt als "verboden" aangenomen), maar zal van N3 naar N2 gaan (deze overgang is klein en wordt als stralingsloos verondersteld). De overgang van N2 naar N1 wordt verkregen door gestimuleerde emissie, waarbij de fotonversterking plaatsvindt. Dit drie-niveausysteem heeft het grote voordeel dat de pompenergie nu gescheiden is van de signaalfrequentie (N2→N1). Er wordt namelijk geen energie uit de signaalfrequentie meer onttrokken om deeltjes te exciteren, omdat er al inversie is (alle zijn al door de pompenergie in een hoger niveau gebracht), maar er treedt een veel grotere versterking van fotonen op.

De intensiteit

Er zijn tegenwoordig nogal wat verschillende typen lasers met evenzoveel verschillende vermogens van minder dan 1 milliwatt tot enkele megawatts (zie tabel 1). Omdat het vermogen op een kleine diameter is toegespitst, kan een rechtstreekse bundel van 1 mW al een flinke beschadiging aan het oog toebrengen en kan een bundel van enkele kilowatts met gemak door een stalen plaat of bijvoorbeeld een baksteen heen branden. Er moet dan ook altijd met grote voorzichtigheid worden gewerkt. De vermogensgetallen moeten



Figuur 8

Soort	Werkzame stoffen	Overgangen	Golflengten	Vermogen (continu uit- gevoerd licht)	Pomp	Toepassingen
GASLASERS						
neutrale atomaire lasers	He-Ne, Ne, Ar, Kr, Xe, O, C	elektronenbanen	zichtbaar licht of infrarood	200 mW	gasontlading	holografie metingen
geïoniseerde gaslasers	Ar, Kr, Xe, Ne, Cl, Br, S, P, Hg	elektronenbanen	zichtbaar licht of infrarood	100 W	gasontlading	holografie chirurgie fysische metingen - pomp voor kleurstofasers
neutrale moleculaire gaslasers	CO, CO ₂ , NO, H ₂ O, H ₂ , O ₂ , HCN, CS ₂	elektronenbanen (doorgaans onder druk) en rotatie vibratieniveaus	ver-infrarood	10 - 500 W	gasontlading	bewerken materialen chirurgie communicatie fysische metingen
KLEURSTOFASERS (vloeistoflasers)	organische kleur stoffen, rodamine B of GC, polymethines opgelost in alcohol	elektronenbanen	zichtbaar licht of nabij infrarood continu afneembaar in beperkt gebied	60 mW	optisch gepompt	fysische metingen
VASTE STOFASERS	Cr ³⁺ in Al ₂ O ₃ , Ho ³⁺ , Ce ³⁺ , Nd ³⁺ of Eu ³⁺ in Y ₂ Al ₂ O ₇ , Y ₂ Ga ₂ O ₇ of YAlO ₃	elektronenbanen	zichtbaar licht of infrarood	100 W	optisch gepompt	trimmen weerstanden fysische metingen
HALFGUIDELASERS (meest injectielasers)	GaAs, CdS, Inbb, GaSb, PbS	elektron-gat recombinatie	zichtbaar licht of infrarood	10 W	injectie geladen deeltjes elektronenstraal	communicatie radar fysische metingen
CHEMISCHE LASERS	HF, DF, DF ₂ , CO	rotatie vibratieniveaus	ver-infrarood	< 1 kW	energie vrij komend bij chemische reacties	fysische metingen
GASDYNAMISCHE LASERS	N ₂ , CO, He, Ne, CO ₂ , H ₂ O	vibratieniveaus	2 - 14 μm	20 kW	bezettinginversie (g) - plotseling expanderen van heet gas (CO)	nog in experimenteel stadium

Tabel 1

echter relatief bekeken worden, robijnlasers bijvoorbeeld geven een korte lichtimpuls van enkele milliseconden met een groot piekvermogen; He-Ne-lasers daarentegen geven een continu laag vermogen af. Ook is het oppervlak, waarop de laserstraal effectief is, een maat waarmee rekening gehouden moet worden. Een leuke vergelijking hierbij is het verschil in dichtheid van vermogen tussen een helium-neon laser van 0,02 watt en de zon met een vermogen van $3,78 \times 10^{26}$ watt. De zon straalt 10^{28} × meer vermogen uit als de He-Ne-laser, maar de openingshoek van de zon is 4π rad en van de laser 10^6 rad, wat betekent dat de vermogensdichtheid van de zon overeenkomt met $5 \cdot 10^{6W/m^2}$ en van de He-Ne-laser $4 \cdot 10^{8W/m^2}$, dit is $\approx 100 \times$ groter als van de zon! Hieruit blijkt wel dat het mogelijk is om plaatselijk een enorme hoeveelheid energie samen te bandelen, zoals bij de laser waar bijna alle energie in een dunne stralenbundel is geconcentreerd.

Fasecoherentie

Wanneer men lichtbronnen uit het dagelijks leven bekijkt, zoals bijvoorbeeld gloeilampen, de zon en gasontladings-

lampen, zenden ze wit licht uit, welke uit zeer veel verschillende golflengten bestaat, het breidt zich gelijkmatig naar alle kanten uit. Het licht van deze thermisch aangeslagen bronnen bestaat uit spontaan uitgezonden straling van zeer veel atomen. Tussen het moment waarop en de richting waarheen en de emissie plaatsvindt, is geen enkel verband. Het vindt volledig random plaats. Dit betekent dat deze bronnen niet-coherent licht uitstralen. De laser daarentegen produceert licht waarvan de richting en het tijdstip wel in een verband plaatsvindt. De golflengte is altijd gelijk, monochromatisch licht dus, wat coherent¹⁾ is en een gevolg is van gestimuleerde emissie. Dit coherente licht is voor veel experimenten en toepassingsvormen een eerste vereiste

Directiviteit

Het licht heeft de eigenschap zich rechtlijnig voort te planten, maar om grote afstanden te overbruggen is er een probleem, het divergeert namelijk. Een goed voorbeeld hiervan is bijvoorbeeld met een zaklantaarn iets enkele tientallen meters verder te belichten. Met een laser is het veel eenvoudiger om zelfs

op klaarlichte dag een puntje te projecteren, wat nog zichtbaar is ook op meer dan 100 meter. De divergentie van een goede laser is zo klein, dat wanneer men deze op de maan zou richten de diameter maar zo'n 3 kilometer zou zijn. De oorzaak van deze kleine divergentie komt door een aantal dingen. 1. de opening van de laser is zeer klein, deze varieert van ten hoogste enkele centimeters tot slechts minder dan een millimeter; 2. de golflengte van de straal is zeer klein; 3. de fotonen worden eerst een aantal malen weerkaatst tussen twee evenwijdige spiegels (figuur 9). De divergentie is afhankelijk van de nauwkeurigheid van de spiegels, de zogenoemde k-factor, de golflengte λ en de straaldiameter bij het verlaten van de laser. In het voorgaande is beschreven hoe een foton een tweede foton kan doen ontstaan. Dit verschijnsel is noodzakelijk voor de versterking. Alleen wanneer de winst groter is dan de verliezen kunnen de fotonen tussen de twee spiegels gaan resoneren. Het laserelement (figuur 9) vormt samen met de twee spiegels een trillingsruimte, die de Farby Perot resonator genoemd wordt en fungeert als een terugkoppeling (figuur 9). De versterking die hierin optreedt bij continu lasers ligt tussen de 0,5 en 1,0 \times per doorgang, wat weinig is vergeleken met impuls lasers welke een winst kunnen maken van 10^6 per doorgang.

Opbouw en werking van lasers

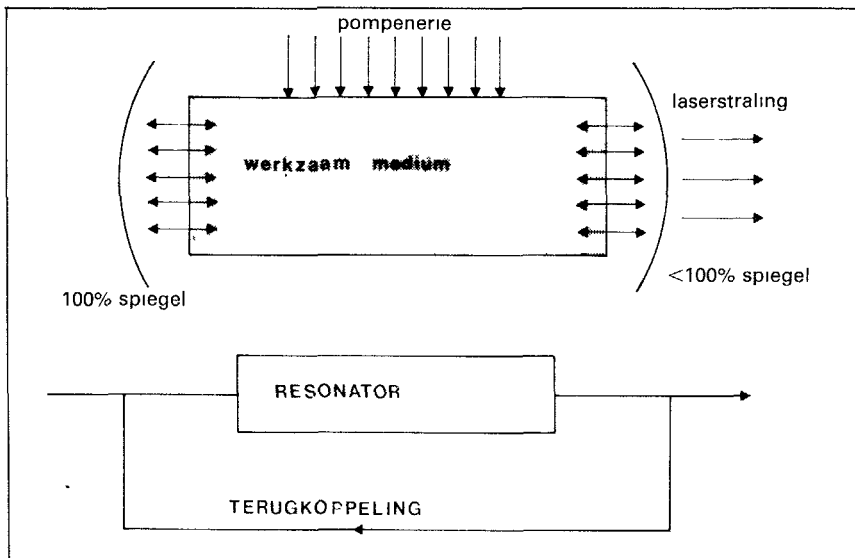
Er zijn op het moment nogal wat typen en soorten lasers. Ze zijn echter in vier hoofdgroepen onder te verdelen, te weten:

- vaste-stof-lasers (bijvoorbeeld robijn)
- gas-lasers (He-Ne)
- halfgeleider-lasers (PbS-GaAs-dioode)
- chemische lasers

Alle vier worden beschreven, te beginnen met de oudst bekende laser.

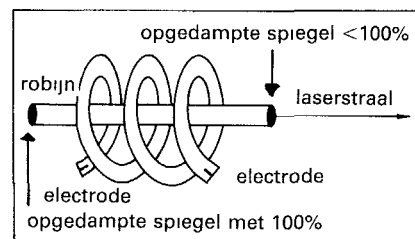
De vaste stof laser

De eerste laser die werd gebouwd was er één die bestond uit aluminiumdioxide (Al_2O_3), waarin een zeer klein percentage chroom³ ionen gedopeerd⁴⁾ (0,05%). Deze robijnen worden kunstmatig gekweekt volgens hetzelfde principe dat wordt toegepast om halfgeleider kristallen te kweken. Het kleine beetje chroom dat er in aangebracht is, is verantwoordelijk voor de lichtemissie. De robijn-laser kan slechts alleen als impuls-laser fungeren. Dit komt



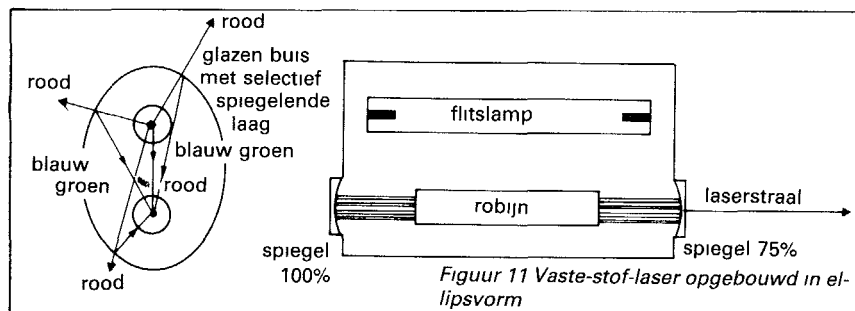
Figuur 9

doordat de pomplichtbron ook infrarode straling afgeeft. Dit zou bij continu werking een enorme warmte-ontwikkeling tot gevolg hebben. Figuur 10 laat de bouw van een vaste stof laser zien, waarbij de eindspiegels direct op het kristal zijn opgedampt. Het kristal bestaat bijvoorbeeld uit een robijn van 1 cm middellijn en 10 cm lengte, de eindvlakken zijn tot op $\lambda/10$ evenwijdig vlakgepolijst. Eén van de spiegels heeft een doorlaatbaarheid van zo'n 25%. Dit kan zo hoog zijn, omdat de robijn een grote versterking geeft, er blijft genoeg licht over voor terugkoppeling. Om de robijn bevindt zich een flitslamp, die de pomp-energie levert. De opstelling is echter niet zo gunstig, omdat een groot gedeelte van het licht gewoon verloren gaat door de ongunstige uitstraling van de lamp, en het flitstraject van deze lamp is relatief lang, zodat een goede intensieve puls niet mogelijk is. Ook de opgedampte spiegels zijn niet meer te vervangen, evenals de flitslamp, welke moeilijk is te vervangen (± 10.000 flitsen). Daarom is deze opstelling nu verdrongen door één die minder last heeft van deze nadelen (figuur 11). Het bestaat uit een elliptische cilinder, waarbij

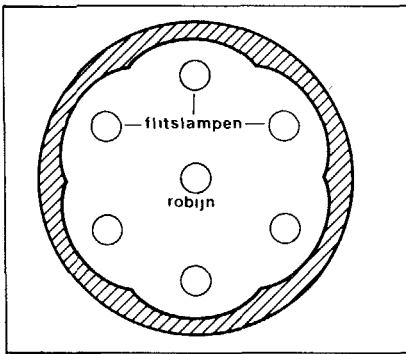


Figuur 10

in de ene brandlijn een robijn is geplaatst en in de andere de flitslamp. De wand heeft een zodanige spiegelende laag, dat eigenlijk alleen de groene en blauwe stralen worden gereflecteerd en vervolgens in de robijn worden gefocuseerd. De andere straling gaat gewoon door de reflecterende laag naar buiten. De spiegels zijn afzonderlijk opgesteld, waardoor ze makkelijker zijn te stellen en ook geen last hebben van warmte die wordt geproduceerd door de robijn. Figuur 12 laat een doorsnede van een robijn-laser zien, waarbij meerdere flitslampen worden gebruikt, welke men dan achter elkaar laat flitsen, zodat de laser een aantal impulsen snel achtereen kan afgeven. Tabel 2 geeft een idee van de vermogens bij vaste stof lasers.



Figuur 11 Vaste-stof-laser opgebouwd in ellipsvorm



Figuur 12 Vaste-stof-laser met zes flits

De gas-laser

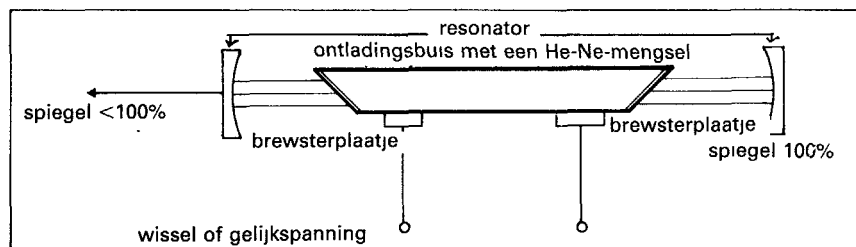
De gas-laser bestaat net als de vaste stof laser uit 3 hoofddelen, namelijk een (edel)gas welke dient als laser materiaal, een resonator (twee tegenover elkaar geplaatste spiegels) en een energiebron voor het aanslaan van de gasontlading, het pompen dus.

Gas-lasers kunnen praktisch voor alle toepassingen dienen, behalve wanneer er zeer grote piekvermogens nodig zijn. De golflengte kan, mits men een geschikt materiaal kiest, variëren van ultraviolet licht ± 200 nm tot ver in het infrarood $\approx 0,4$ nm. Het rendement om de elektrische energie in licht om te zetten, is zeer laag, vergeleken met bijvoorbeeld een halfgeleider-laser. Een voordeel is dat ze compact gebouwd kunnen worden, waardoor ze erg geschikt zijn voor laboratorium-toepassingen. De gas-lasers kunnen in 3 hoofdgroepen worden onderverdeeld: atoom-lasers, ionen-lasers en moleculaire lasers.

Atoom-lasers

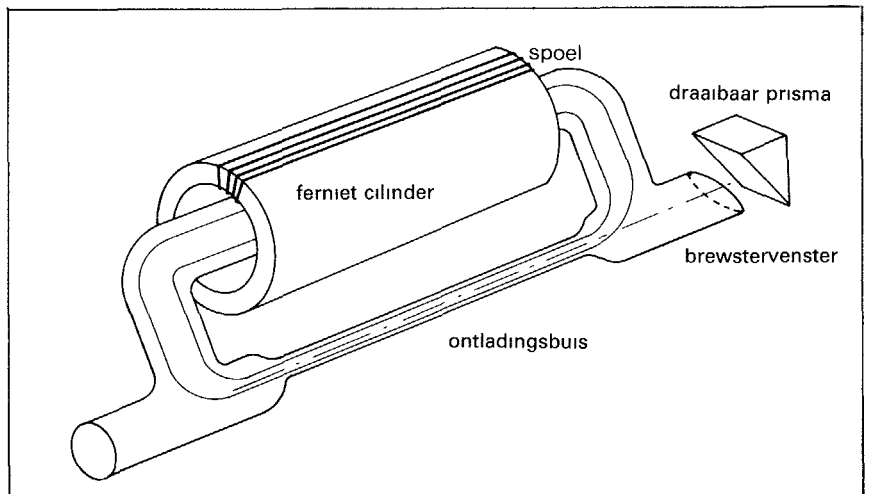
De bekendste en nog steeds meest gebruikte laser is de He-Ne-laser, die een mengsel van 90% Helium en 10% Neon bevat (figuur 13). Dit bevindt zich in een laserbuis, waarin door ontleding (meestal met gelijkspanning) inversie wordt opgewekt. Deze buis staat tussen twee sferische spiegels, de resonator, waarvan de één 99,9% en de andere 98% reflecteert. Op de uiteinden van de buis zitten 2 glaasjes (brewstervenster) welke het licht polariseren. Het vermogen van de He-Ne-lasers ligt tussen de 1 mW en 100 mW.

Figuur 13



Tabel 2

Laser-materiaal	Golflengte nm	Kristalafmeting L mm	d mm	Impuls-energie Ws	Uitgangsvermogen	Impulsreeks imp/s	Impulsduur	Straaldivergentie mrad	Wijze van bedrijven
YAG Nd	1060	750	30		20 kW	5000	100 ns	4	reuzenimpuls
glas Nd	1060	75	6	1	3,5 kW	1	300 μ s	10	normaal
glas Nd	1060	300	12	200	100 kW	1	2 ms	4	normaal
glas Nd	1060	1000	25	60	1 GW	0,006	60 ns	5	reuzenimpuls
robijn	694	75	9	5	5 kW	0,2	1 ms	3	normaal
robijn	694	80	0,8	8	16 kW	1	500 ns	2	normaal
robijn	694	100	9,5	1	50 MW	0,02	20 ns	5	reuzenimpuls
robijn	694	100	9,5	50	70 MW	0,1	700 ns	10	reuzenimpuls
robijn	694	170	10	125	150 MW	0,2	1 μ s	10	reuzenimpuls
robijn	694	170	10	200	200 MW	20	1 μ s	10	reuzenimpuls
robijn	694	100	15	50	250 MW	0,03	200 ns	5	reuzenimpuls
robijn	694	150	15	100	350 MW	3	300 ns	5	reuzenimpuls
robijn	694	200	19	150	750 MW	0,03	200 ns	10	reuzenimpuls
robijn	694	100	19	100	500 MW	0,03	200 ns	5	reuzenimpuls
robijn	694	100	19	150	10 GW	0,03	15 ns	3	reuzenimpuls



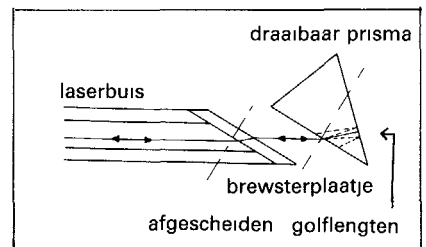
Figuur 14

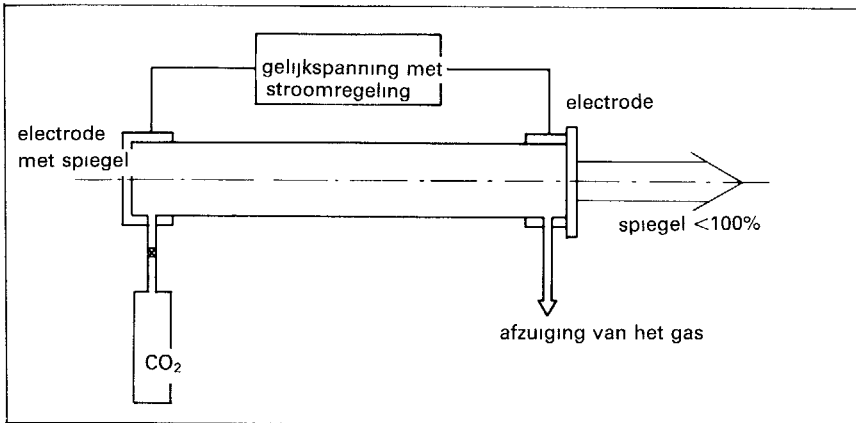
Ionen-lasers

De meest gebruikte ionen-lasers hebben een vulling van argon of krypton gas. Doordat het vermogen bij deze lasers afhankelijk is van de stroomdichtheid en niet van de buisdiameter, zoals bij de atoom-lasers, is deze meestal stukken hoger. Ook kan argon op verschillende (8) golflengten licht uitzenden, welke voor het oog zichtbaar zijn. De ionisatie gebeurt door kathodestraaling: door verhitting van een kathode worden elektronen uitgezonden die met positief geladen platen worden versneld, totdat ze elektronen van de gasatomen wegrukken. Hetzelfde kan ook met hoogfrequente straling, zon-

der verhitte kathode worden bereikt (figuur 14), wat als voordeel heeft dat de electrodes niet slijten door erosie. De laser werkt inversie op in geïoniseerd argon, dat zich bevindt in een buis die in de vorm van een rechthoek is gebogen. Deze buis heeft in het lasergeedeelte een kleinere doorsnede dan in het aanslaggedeelte en bevindt zich in een resonator die bestaat uit een sferische spiegel en een prisma (figuur 15), door het draaien van dit prisma kan de argon-laser op verschillende golflengten trillen. Het vermogen ligt meestal tussen de 2 en 100 W continu.

Figuur 15





Figuur 16

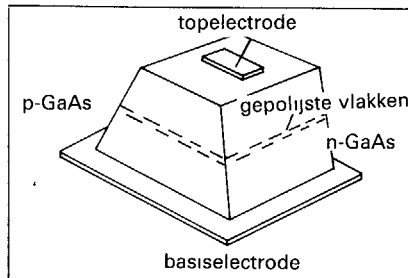
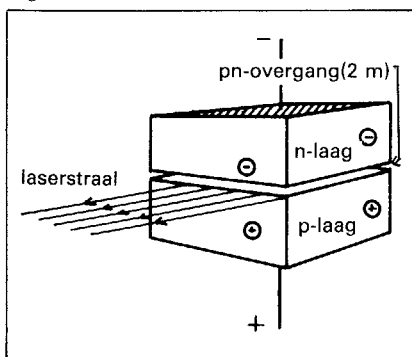
Moleculaire lasers

De bekendste in deze soort is de CO₂ laser, een infrarood straler op een golflengte van 10600 n, het is de sterkste continu laser, zo'n 1200 W en wanneer hij pulserend werkt kan het vermogen nog eens 10 000 x groter worden. CO₂ is het enige gas dat chemisch voldoende stabiel is om een directe excitatie te kunnen doorstaan zonder atomen te ontbinden. Het rendement is vrij hoog, zo'n 15%. De voornaamste toepassing van deze laser is materiaalbewerking, zoals las-, snij- en boorbewerkingen. In o.a. staal (figuur 16) laat de CO₂ laser schematisch zien. De laserbuis wordt niet, zoals bij andere gas-lasers met een gas gevuld en dan afgesmolten, maar heeft een voortdurende doorstroming van een gasmengsel, welke door een pomp geregeld wordt. De mengverhouding wordt met fijnregelventielen ingesteld. Twee ringelectroden zorgen voor de elektrische ontlading. De laserbuis is rechtstreeks tussen de resonator geplaatst, er zijn geen Brewsterplaatjes nodig, omdat de laser ver in het infrarode gebied werkt. De diameter van de straal ligt meestal rond de 10 mm.

Halfgeleider-lasers

Halfgeleider-lasers bestaan uit een ongeveer 1 mm³ groot halfgeleider kristal (figuur 17 en 18) met een pn-laag. De

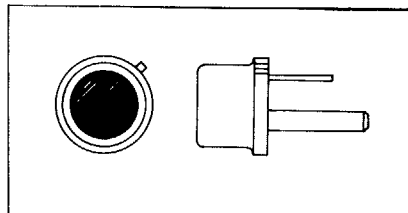
Figuur 17



Figuur 18

inversie wordt verkregen door elektroneninjectie van een elektrische stroom. Bij recombinatie³⁾ van electronen en gaten ontstaat spontane emissie, welke dan in de overgang versterkt wordt door gestimuleerde emissie. Deze versterking is bij de halfgeleider-laser enorm groot. Doordat het halfgeleidermateriaal een grote brekingsindex heeft, wordt er voldoende straling gereflecteerd om als laser te gaan werken. De eindvlakken van het kristal vormen de resonator. De halfgeleider-laser (diode) (figuur 19) kan zowel con-

Figuur 19 Halfgeleider laser in TO-5-omhulsel

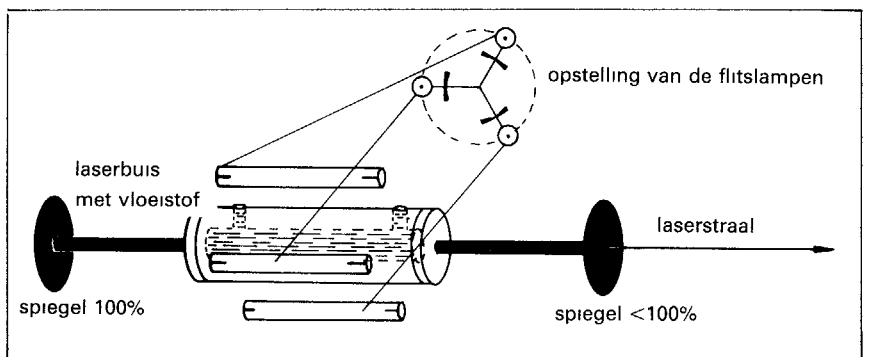


tinu als impulerend werken. Het maximale uitgangsvermogen is afhankelijk van de bedrijfsvoorwaarden, zoals o.a. de temperatuur en de stroom. Er zijn al GaAs-lasers die met een hoge impulsfrequentie een uitgangsvermogen van zo'n 200 W halen bij kamertemperatuur! De GaAs-laser komt het meest voor in zijn soort. Een nadeel van de diodelaser is de grotere divergentie. Dit komt door de erg kleine afmetingen. Een voordeel is het hoge rendement, zo'n 50% en kan op het moment in laboratoriumfase al bijna 100% halen. Het uitgestraalde licht heeft een golflengte van 800 à 900 nm (rood). Een ander groot voordeel is de directe omzetting van elektrische stroom in licht, wat tevens een eenvoudige modulatie van de laserstraal mogelijk maakt door het modulatiesignaal gewoon te superponeren op de voedingsstroom.

Chemische (vloeistof-)lasers

De vloeistof-laser staat nog in de "kinder schoenen". Het laser-materiaal is in een oplosmiddel opgelost wat als voordeel heeft dat de concentratie nauwkeurig ingesteld en geregeld kan worden. Ook de koeling kan eenvoudig geregeld worden door gewoon de vloeistof rond te pompen. Het oplosmiddel is vrijwel altijd alcohol, de laserstof, vooral zeldzame aarden zoals europium, samarium en terbium, maar ook verschillende organische stoffen, die fluoriseren. Door in dezelfde laseropstelling de vloeistof te verwisselen, kan men de kleur ook variëren van groen tot rood. Figuur 20 laat een vloeistof-laser opstelling zien waarbij een xenonflitslamp wordt gebruikt voor het aanslaan. De vloeistof-laser kan alleen pulserend werken. Zowel het rendement als het vermogen zijn nog niet echt groot, maar zal in de toekomst zeker beter worden. Er is op het moment veel belangstelling voor deze laser, omdat de vloeistof vele voordelen heeft.

Figuur 20 Principe vloeistoflaser met drie flitslampen

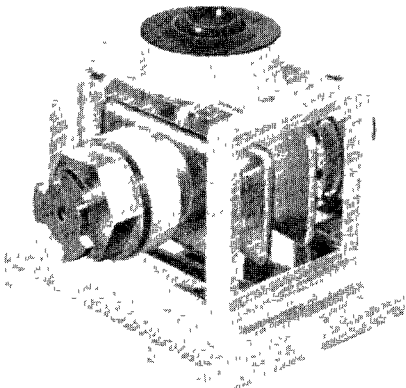


De lichtschakelaar

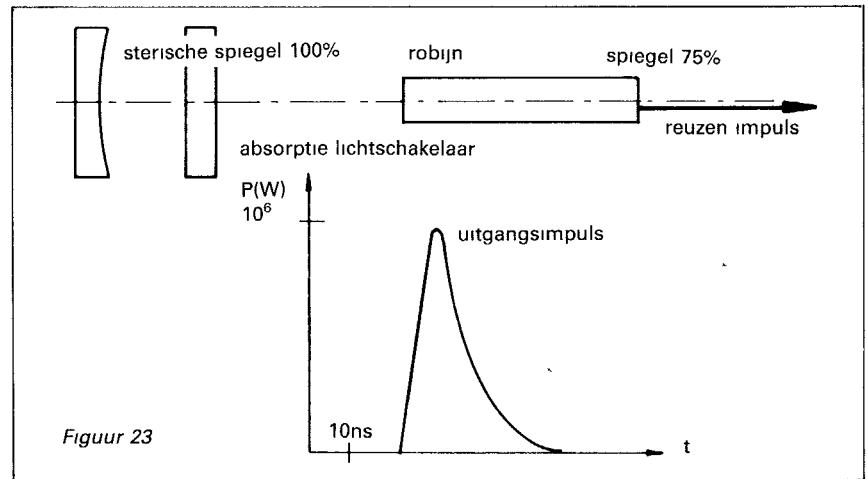
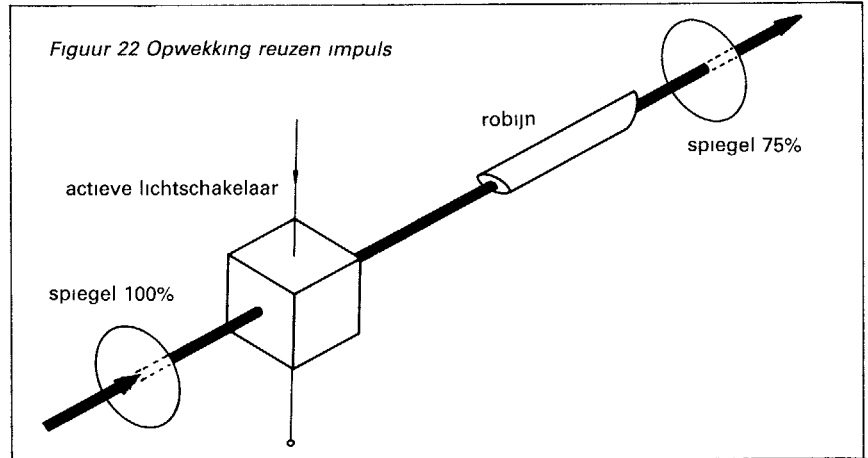
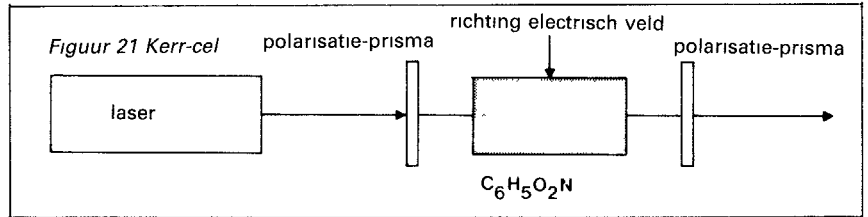
Een laser kan met behulp van een lichtschakelaar enorme piekvermogens afgeven (zie tabel 2). Er zijn actieve en passieve lichtschakelaars.

De actieve lichtschakelaar (de kerr-cel)

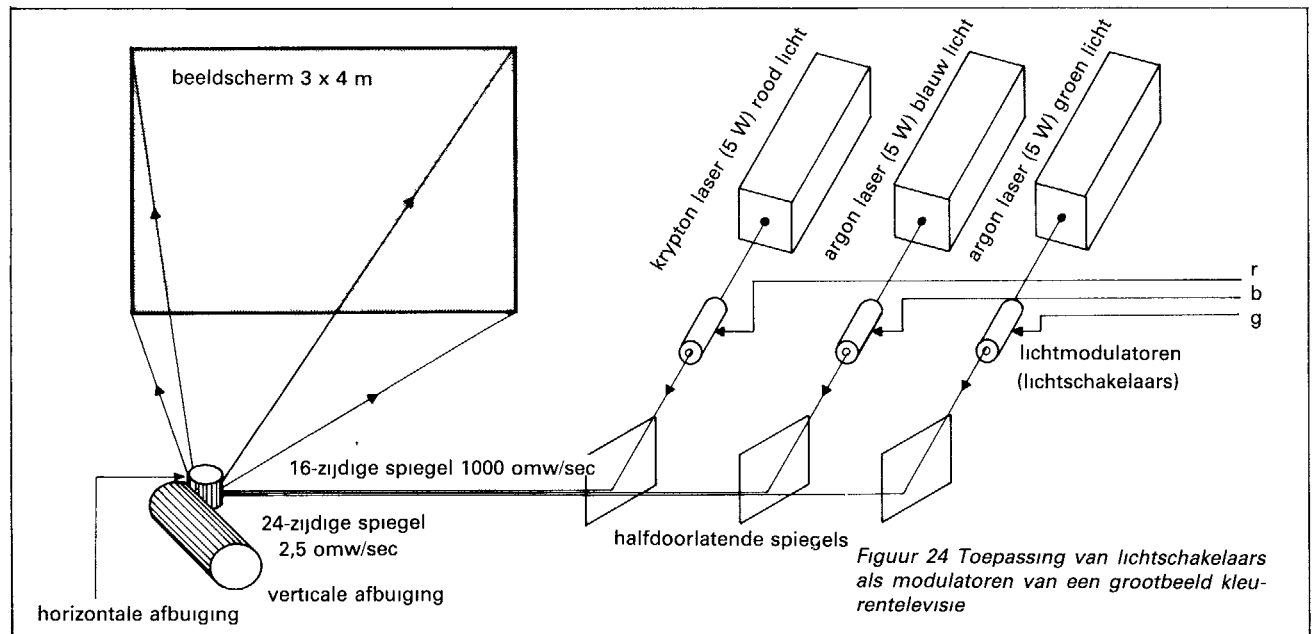
De kerr-cel (figuur 21, 22 en 22a) bevat meestal nitrobenzeen ($C_6H_5O_2N$) een vloeistof die onder invloed van een elektrisch veld vereenvoudigd gezegd open of dicht kan worden gezet. Wanneer de lichtschakelaar op "uit" staat en de pomplichtbron ingeschakeld is, worden alle laserniveaus gevuld. Als dat gebeurd is, zet men de schakelaar heel snel open (wat in minder dan 1 ns kan gebeuren), waardoor in zeer korte tijd alle energie vrijkomt. Het laserniveau loopt dan in ongeveer 10 ns leeg. Gevolg is dat in die tijd pulsen vrij kunnen komen van enkele megawatts tot een gigawatt toe.



Figuur 22a Kerr-cel van Cilas voor een maximumenergie van $1 J/cm^2$



Figuur 23



Figuur 24 Toepassing van lichtschakelaars als modulators van een grootbeeld kleurentelevisie

De passieve lichtschakelaar

De passieve lichtschakelaar (figuur 23) bestaat uit een absorptiecel, die het laserlicht bij kleine intensiteiten absorbeert. Wordt er echter te veel licht in de absorberende cel gestuurd, dan treedt verzadiging van de absorptie op en wordt de cel plotseling transparant voor de lasergolflengte. Op dit moment treedt terugkoppeling op en geeft de laser een reuzenimpuls af. De cel keert dan weer terug in de absorptiestand.

Mechanische lichtschakelaars

Deze worden weinig gebruikt omdat ze traag zijn. Ze komen meestal voor als draaiend prisma of spiegel en zijn goedkoper als de cellen.

Enkele veel gebruikte optieken bij lasers

Er is een aantal optische bouwelementen die veel in de lasertechniek worden gebruikt, zoals lenzen, prisma's en spiegels. Deze worden daarom even beknopt behandeld.

Lenzen

De optische lenzen bestaan uit glas, zijn meestal rond en door twee sferische of bolvormige vlakken begrensd. Figuur 25 geeft de stralengang door een lens weer. Hij heeft twee kenmerken, namelijk de brandpuntafstand en de middellijn. Tegenwoordig worden lenzen vaak gecoat om ongewenste spiegelingen te vermijden (kwaliteitsverhoging). Bij lenzen in de lasertechniek is dit voor

100% mogelijk en noodzakelijk, omdat er anders interferentie⁶⁾ optreedt. De laserstraal heeft het nadeel dat de diameter van de straal vaak te klein is voor veel experimenten. Door nu twee bolle lenzen achter elkaar te zetten krijgt men een verrekijker (figuur 26), die de straaldiameter kan vergroten. Het diafragma is nodig om onvermijdelijke interferentie en buigingsverschijnselen te voorkomen

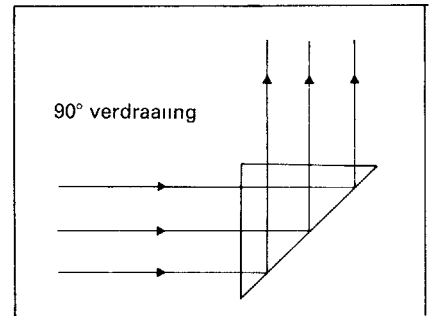
Prisma's

Het eenvoudigste prisma om een lichtstraal 90° van richting te veranderen is het gelijkzijdige rechthoekige prisma (figuur 27). Aan de basis worden de stralen door totale reflectie omhooggestuurd. Figuur 28 laat zien hoe hetzelfde prisma de stralengang 180° kan laten omkeren. De 180° kan alleen met zeer nauwkeurige instelling worden verkregen.

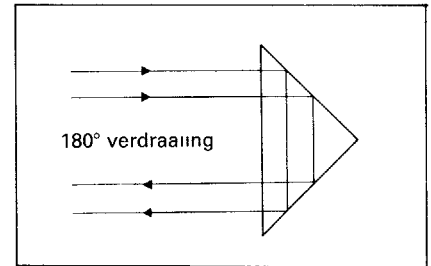
Figuur 29 is een vijfzijdig prisma dat onafhankelijk van de invalshoek de lichtstraal altijd 90° verandert (makkelijker instellen dus). Om een richtingverandering van 180° te krijgen die ook onafhankelijk is van de invalshoek, wordt een zogenaamde tripelspiegel (figuur 30) gebruikt.

De planparallele plaat

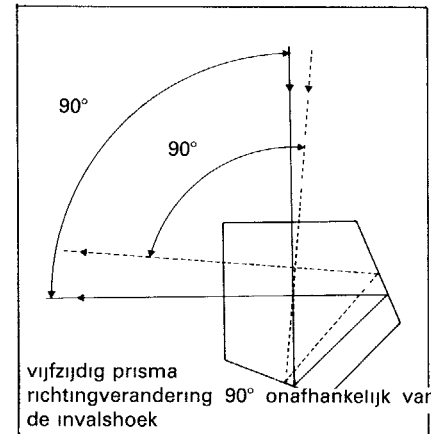
Wanneer een lichtstraal niet loodrecht op een vlakke glasplaat valt, ondergaat hij een verplaatsing naar opzij (figuur 31). Bij het instellen moet hier altijd goed opgelet worden in verband met de breking.



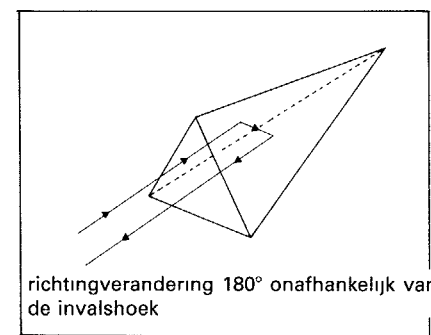
Figuur 27 Gelijkzijdig rechthoekig prisma



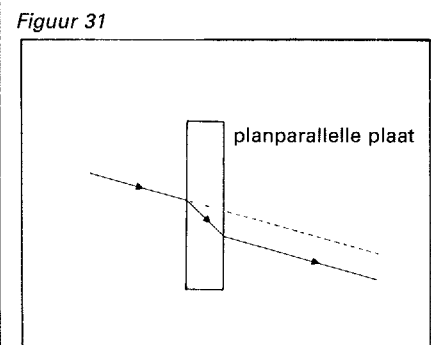
Figuur 28 Gelijkzijdig rechthoekig prisma



Figuur 29

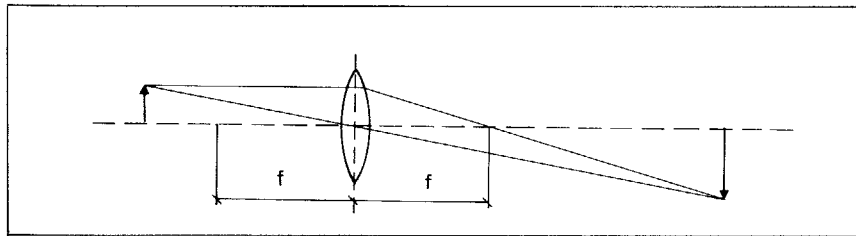


Figuur 30

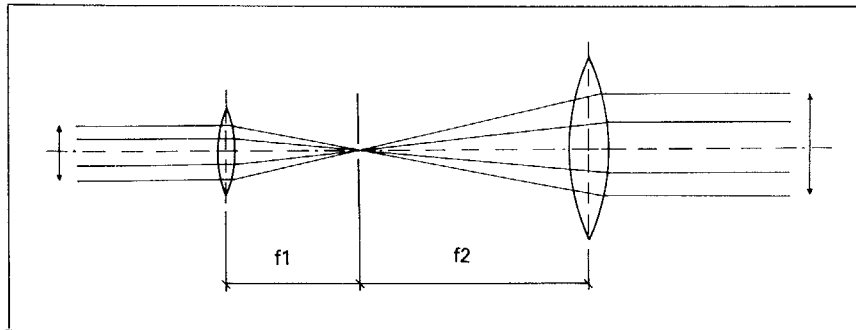


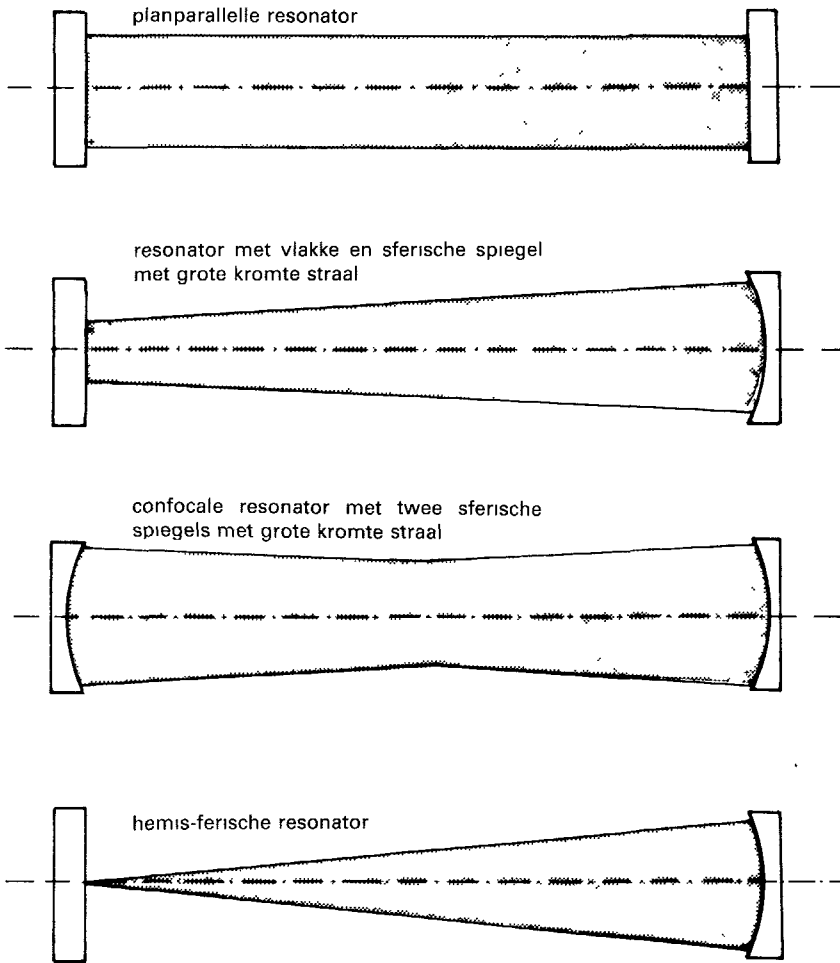
Figuur 31

Figuur 25 Stralengang door bolle lens



Figuur 26 Bundel diametervergroting





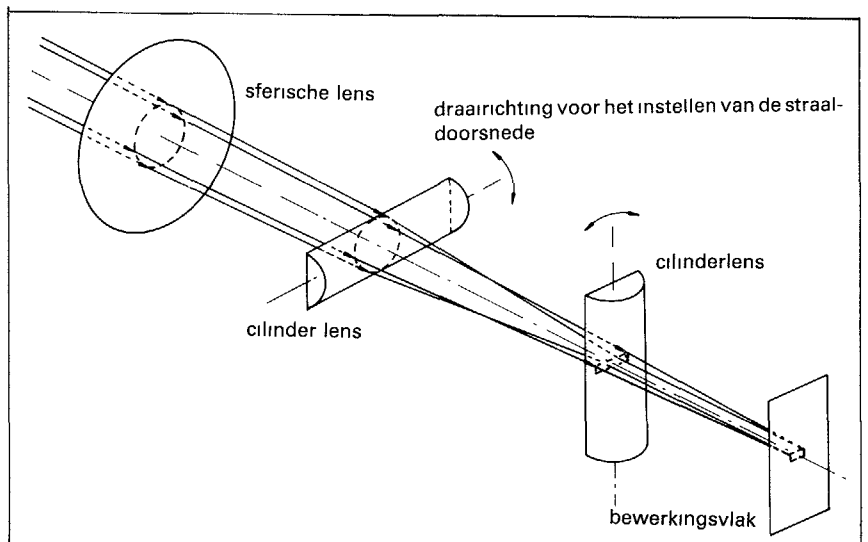
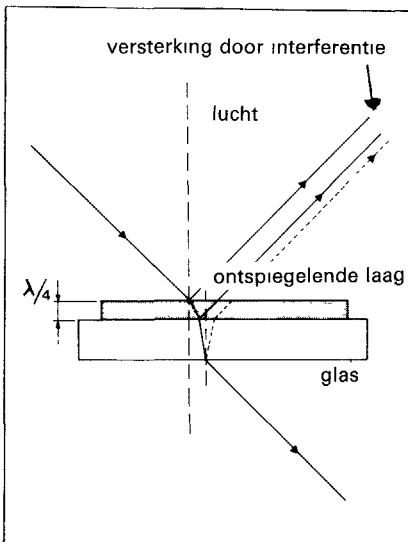
Figuur 32 Verschillende resonatoren

Spiegels

De resonator van een laser bestaat uit twee tegenover elkaar geplaatste spiegels. Dit zijn meestal interferentiespiegels in een vlakke of sferische vorm (figuur 32) Deze spiegels worden gebruikt omdat ze verliesvrij zijn. Het prin-

cipe van een interferentiespiegel is weergegeven in figuur 33. Door een ontspiegellaagje of coating worden storende reflecties opgeheven. De werking is echter alleen 100% bij de goede invalshoek en golflengte; de hoekafwijking mag niet meer dan 5° bedragen.

Figuur 33 Ontspiegeling door interferentie



De toepassingsmogelijkheden

Materiaalbewerking met laserstralen

De energie van het licht in een laserimpuls kan in zeer korte tijden worden afgegeven, wat een hoog vermogen betekent. Dit hoge vermogen kan door middel van een lens op een klein oppervlak worden gefocuseerd. Dan ontstaat een zo hoge vermogensdichtheid of intensiteit, dat het materiaal gewoon verdampt (figuur 34). Wanneer men van deze eigenschap gebruik maakt, kan het materiaal doorgesneden worden in zeer harde materialen. Het boren moet wel pulserend gebeuren om de warmte in het materiaal te kunnen afvoeren. Een laserstraal kan ook voor solderen en lassen worden gebruikt. De impulsen moeten dan wat langer zijn, zodat de warmte zich gelijkmatig kan verdelen, anders ontstaat een verbinding die niet houdt. Een groot nadeel van materiaalbewerking met licht is de warmtegeleiding die slecht is en de reflectie waardoor verliezen ontstaan. De enige manier om de laserstraal af te buigen, is door middel van een mechanische afbuiginrichting (spiegels), omdat anders het hele lasersysteem of het werkstuk bewogen moet worden. Ook kunnen met laserstralen zeer kleine onderdelen bewerkt worden zonder dat de omgeving sterk verwarmd wordt. Dit wordt dan ook veel toegepast bij de bouw van geïntegreerde schakelingen in de electronica (chips).

Figuur 34

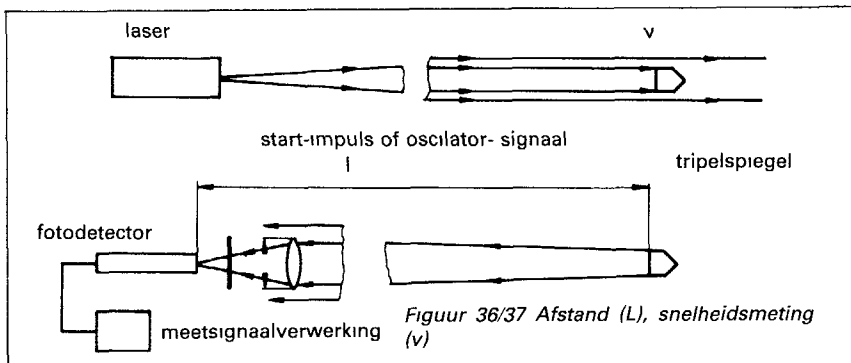
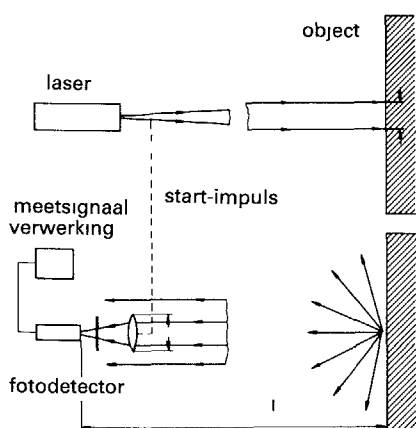
Toepassingen in de geneeskunde

De toepassing van laserstralen in de geneeskunde staat ook nog in de kinderschoenen. Er zijn echter al ziekenhuizen, die speciale ruimten hebben voor de behandeling met laserstralen. Ook hier gebruikt men gebundelde stralen met een hoog impulsvermogen. Op het moment worden ze regelmatig gebruikt bij netvliesloslating en bij de behandeling van een aantal soorten hersenkanker. Het mooie bij de netvliesbehandeling is, dat er niets opengesneden moet worden en er ook geen narcose nodig is, omdat de behandeling pijnloos geschiedt. Alleen kan men een tijdje niet zien, wat vermoedelijk komt door strooilight. Een groot voordeel bij de kankerbehandeling is dat er selectief wordt gewerkt. Alleen de gekozen plaats wordt door de laserstraal getroffen, wat bij röntgen- of radioactieve straling niet het geval is. Daarbij wordt ook het omringende deel beschadigd. De resultaten met deze behandeling (laserbehandeling) zijn enorm positief. Er worden verschillende onderzoeken gedaan om met laserstralen niet of zeer weinig bloedende operaties te doen, welke praktisch pijnloos verlopen. Een groot voordeel hiervan is dat zwakke patiënten weinig bloed verliezen en slechts onder een lichte narcose behoeven te worden gebracht.

Afstandsmeting met laserstralen

De afstandsmeting is gebaseerd op het meten van de tijd tussen uitzending van een lichtimpuls en de ontvangst van deze impuls na reflectie tegen het meetobject (figuur 35). Daarbij kan men zelfs grote afstanden nauwkeurig meten, waar dan echter wel rekening moet worden gehouden met de brekingsindex van de dampkring. Bij gunstige omstandigheden kan men met

Figuur 35 Afstandsmeting



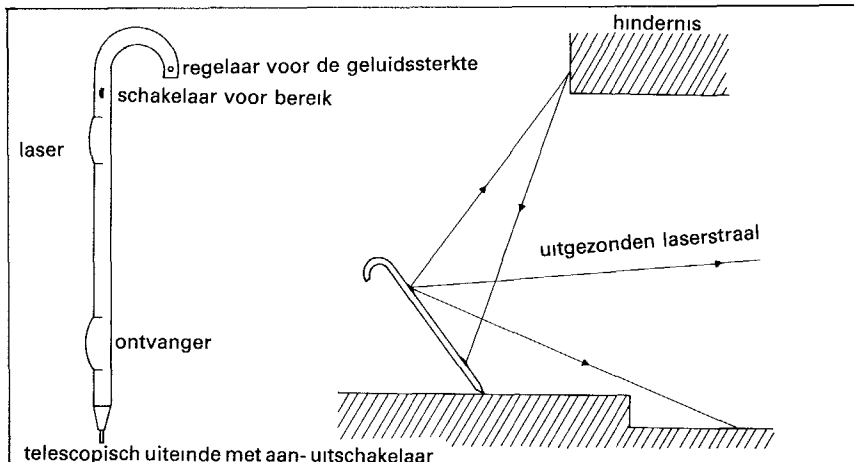
nauwkeurig meetapparaat een difuus reflecterend object tot op een afstand van zo'n 50 km redelijk nauwkeurig meten. Wanneer men op een nog grotere afstand wil meten of bij slechte weersomstandigheden, moet er op het object een spiegel worden geplaatst. Dit is meestal een tripelspiegel (figuur 31, 36 en 37), waardoor een veel sterker teruggekaatst signaal ontvangen kan worden. Een voordeel hierbij is dat het signaal duidelijk is te onderscheiden van stoorreflecties uit de omgeving. Ook is de meetapparaat minder gevoelig voor schokken of trillingen. Zo is het gelukt om met een speciale spiegel op de maan, de afstand aarde/maan tot op een meter nauwkeurig te bepalen. Een leuke toepassing van afstandsmeting is een blindenstok (figuur 38) die voorzien is van een laser en ontvanger. Een blinde is in ferte bij het aftasten van zijn weg slechts aangewezen op de rekwijde van zijn stok. Met behulp van laserstralen kan dit bereik echter tot een veelvoud worden uitgebreid. In de stok bevinden zich een drietal infrarood laserdiodes, die in drie richtingen uitzenden. De eerste bundel is naar beneden gericht en tast hindernissen op de weg af, een tweede bundel doet dit recht naar boven en de derde ontdekt obstakels op ooghoogte. Het meetbereik is zo'n 3 meter. De gereflecteerde

stralen worden door fotodioden ontvangen en in een akoestisch of mechanisch signaal omgezet. Bij een mechanisch signaal drukt een stimulator op de wijsvinger van de blinde. De energievoorziening wordt verzorgd door een in de wandelstok geplaatste accu, welke na zo'n 4 uur weer moet worden opgeladen.

Het meten van snelheden met laserstralen

Het meten van de snelheid van een object met een laserstraal wordt gedaan door gebruik te maken van het dopplereffect. Men gebruikt hiervoor een continue laser, die met een bepaalde frequentie licht uitzendt (figuur 37). Het door het object gereflecteerde signaal wordt samen met een afgetapt signaal van de laser op een fotodetector geleid. Er ontstaat dan een tussenfrequentie, die de detector kan meten, die evenredig is met de snelheid (enkele megaherzen). Snelheden onder de 100 m/s veroorzaken geen problemen wat betreft de nauwkeurigheid, maar erboven wel, vanwege de hoge dopplerefrequenties (300 à 400 MHz), die dan optreden. Doordat de gas-laser, die meestal wordt gebruikt, begrensd is in z'n uitgangsvermogen, kan er maar tot op een afstand van ongeveer 100 meter gemeten worden. Door het aanbren-

Figuur 38



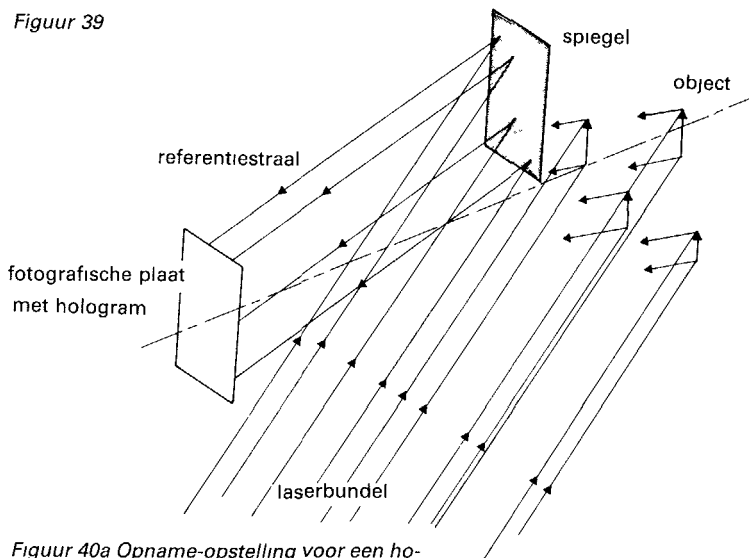
gen van een tripelspiegel is het bereik te vergroten tot een kilometer.

Holografie

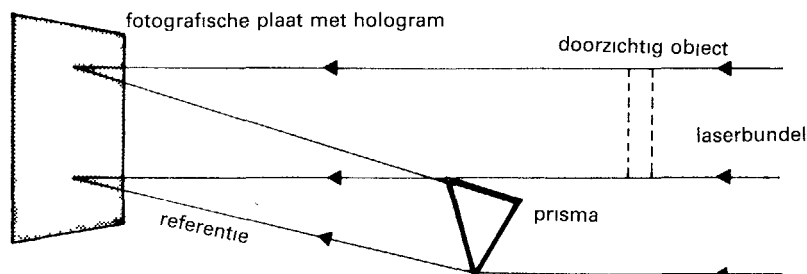
Doordat laserstralen coherent zijn, is er een geheel nieuw fotografisch procédé mogelijk geworden, namelijk holografie. Een voorwerp wordt met laserlicht belicht (figuur 39). Om de intensiteit en de fasen van het licht, dat door het voorwerp is gereflecteerd op een fotografische plaat te kunnen vastleggen, moeten de fasen van de voorwerpgolf door interferentie met een referentiegolf van dezelfde laser, in intensiteit (verschil licht/donker) verschillend worden omgezet. Dit kan op verschillende manieren gebeuren, zoals te zien is in figuur 40a en 40b. Het op de gevoelige plaat vastgelegde hologram laat een interferentiebeeld zien. Om nu het beeld van het voorwerp terug te krijgen, wordt de plaat doorlicht met wederom een laserbundel (figuur 41). Er ontstaat een reëel en virtueel beeld, dat even groot is als het echte voorwerp, een enorme scherptediepte heeft en driedimensionaal is. Het opvallende bij holografie is dat er geen lenzen gebruikt worden voor de opname. De gevoelige plaat, die in slechts één bad ontwikkeld kan worden, moet een zeer hoog oplossend vermogen hebben, die in de buurt, wat grootte betreft, moet liggen van de golflengte van het laserlicht. Een gangbare (kodak) plaat heeft een oplossend vermogen van meer dan 2000 lijnen per millimeter, wat dan een onderlinge afstand van 0,5 m betekent en wat genoeg is voor de golflengten van de argon, He-Ne en robijnlaser. Het vergroten van een hologram is o.a. mogelijk door een divergerende straal te gebruiken bij reconstructie. Bij een andere holografische methode (figuur 42) laat men de referentie en voorwerpgolf uit tegengestelde richtingen komen. Er ontstaat dan een volume-hologram, die ook een structuur en laagdikte laat zien. Een groot voordeel van deze methode is dat men de ontwikkelde plaat bij gewoon wit (niet coherent) licht kan bekijken. Deze methode is ook geschikt voor kleurenholografie door bij de belichting een aantal verschillende kleuren laserlicht te gebruiken om het voorwerp te verlichten. Het meest opvallende hierbij is, dat een gewone zwart/wit plaat gebruikt wordt om de kleuren vast te leggen. Ook hierbij kan de reconstructie van het beeld met gewoon wit licht gebeuren (figuur 43).

Een zeer interessante toepassing van deze methode, gebeurt in de microsco-

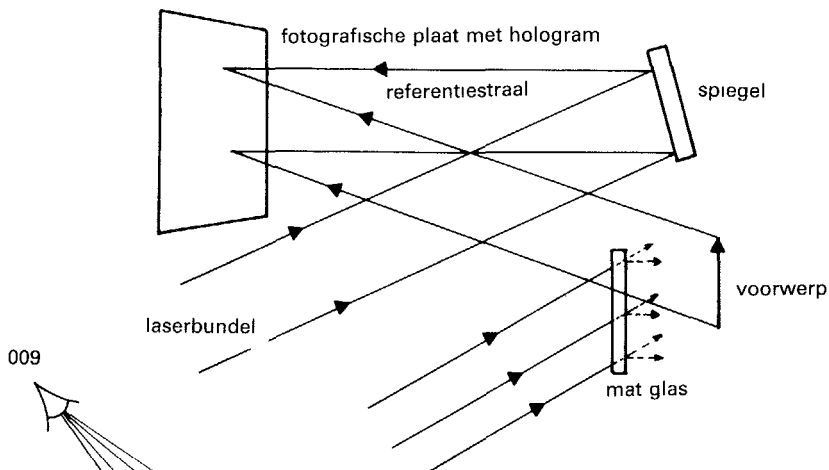
Figuur 39



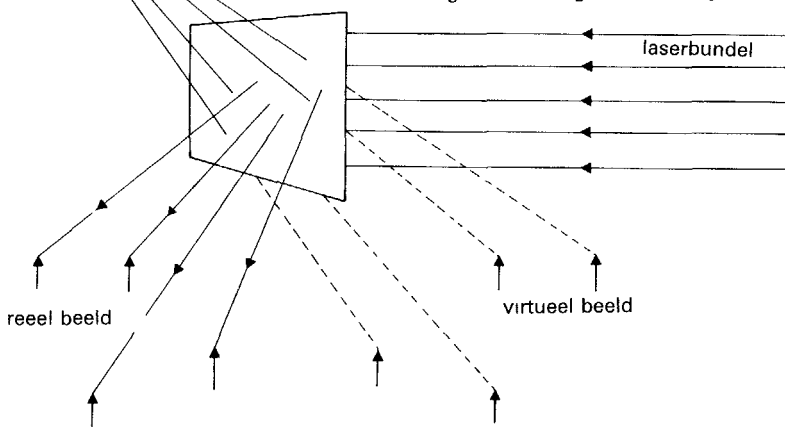
Figuur 40a Opname-opstelling voor een hologram



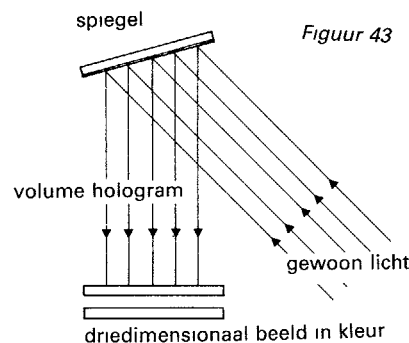
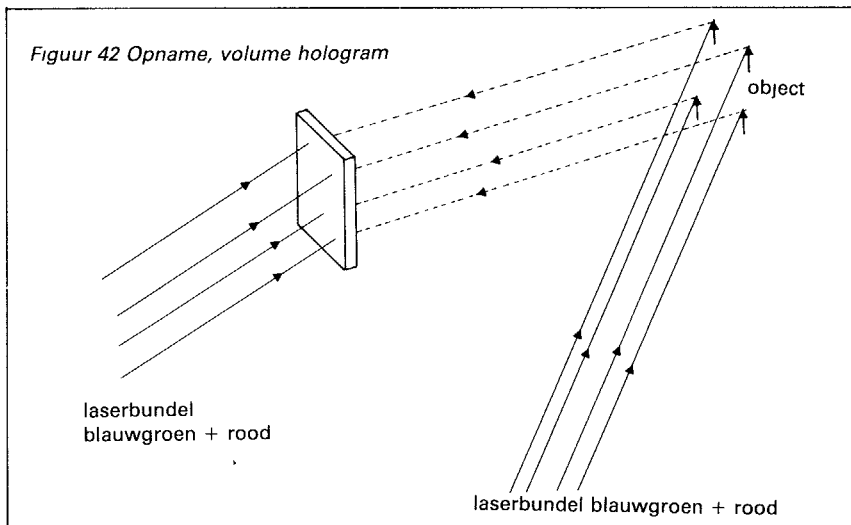
Figuur 40b Opname-opstelling voor een hologram



Figuur 41 Weergave van holografisch beeld



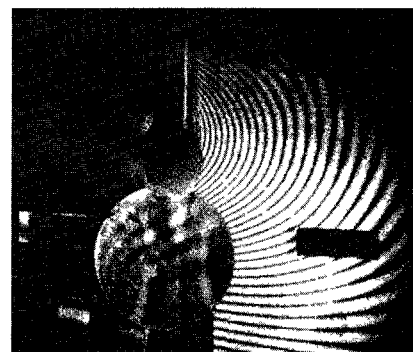
pie In de gewone lichtmicroscopie treden al gauw verscheidene problemen op vooral als de vergroting toeneemt. Het beeld wordt al gauw te donker, maar ook de scherptediepte wordt steeds kleiner. Daardoor is het ook bijna niet mogelijk om kleine levende objecten, die zich bewegen, waar te nemen of laat staan te fotograferen. De holografie brengt hierin een enorme verbetering. De te onderzoeken stof wordt in contact gebracht met de gevoelige plaat (figuur 44) en dan van twee kanten belicht met een zeer korte laserimpuls. Wanneer impulsen van enkele nano- of zelfs pico-seconden worden gebruikt, kunnen zeer snel trillende dingen "stil" worden gezet. Het dan ontstane hologram wat een stilstand en scherptedieptebeeld vertoont, kan dan vergroot worden met een divergerende stralenbundel. Met de microscoop kunnen details nog verder worden vergroot en laten zich gemakkelijk fotograferen, omdat er geen bewegingen in het beeld meer voorkomen. Het vergroten kan tot op de grenzen van het oplossend vermogen gebeuren. Een andere interessante toepassing van holografie is het testen van bijvoorbeeld (machine)onderdelen. Dit gebeurt door eerst een hologram te maken van het onderdeel in onbelaste toestand. Het daarna ontwikkelde beeld wordt dan weer op het onderdeel geprojecteerd. Door het dan te gaan belasten, veranderen de afmetingen een klein beetje, waardoor er interferentieringen zichtbaar worden. Op die manier is dan te zien waar spanningen



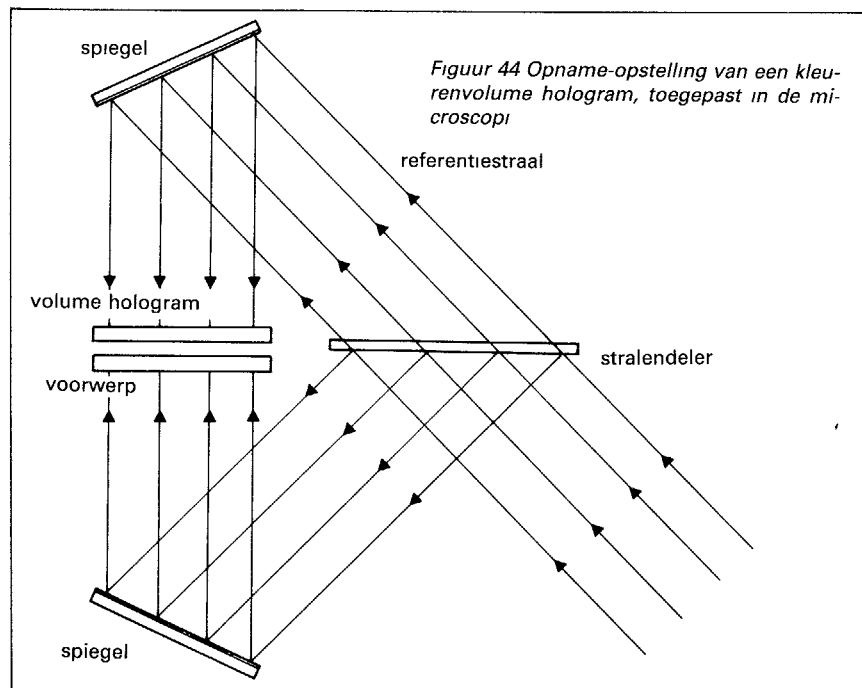
of onregelmatigheden optreden (figuur 45). Met name in de vliegtuig- en ruimtevaartontwikkeling wordt veelvuldig van deze techniek gebruik gemaakt

Samenvatting

Net als voor de microcomputer worden



Figuur 45 Analyse van een machine-onderdeel met behulp van holografische dubbelopnamen. De op vingerafdrukken lijkende patronen op het hologram tonen de plaatsen waar het onderdeel in de praktijk door spanningen is gedeformeerd



voor de laser steeds meer toepassingen bedacht en toegepast. De ontwikkeling staat voorlopig nog niet stil, maar is eigenlijk zelfs in een stroomversnelling geraakt. Eén van de leukste ontwikkelingen op het moment is de audio/video-disk, waarbij een laserstraaltje als aftastelement dient van een optische plaat waar digitale informatie op vastgelegd is. Vooral de verbinding tussen computer/laser-techniek wordt steeds nauwer, met name op het gebied van massageheugens, welke op nagenoeg hetzelfde principe als de audio (compact)disk werken. Dat de ontwikkeling niet stilstaat, blijkt uit de verschillende publikaties in tijdschriften op allerlei vakgebieden. Ook op medisch gebied wordt de laser steeds meer toegepast, zowel voor behandeling als voor onderzoek

Gebruikte literatuur.
Lasers, klaustradowsky spectrum
Technische encyclopedie (Winkler Prins)
Verschillende jaargangen Radio-electronica