

# “Veilig werken met lasers”

Dr. J.G. Siekman,

Wetenschappelijk-Industrieel Adviesbureau Dr. J.G. Siekman.

## Inleiding.

Lasers (1) vindt men in de werkplaats, gebruikt als *meetinstrument* (voorbeelden: het nauwkeurig en contactloos bepalen van positie, snelheid, oppervlakteruwheid) en als *werktuig* (voorbeelden: lassen, boren van kleine gaten, trimmen van allerhand typen weerstanden). Aan de meeste meetlasers zijn door hun lage vermogen geen gevaren verbonden. Met de bewerkingslaser moeten we echter zorgvuldig omgaan in verband met hun vaak beduidend hogere vermogen. Veelal zijn de laatste in een complex (productie-)systeem opgenomen. Een dergelijk systeem is zó ontworpen (dient dit althans te zijn), dat de laser nooit een gevaar zal opleveren voor mens en milieu rond dat systeem.

Kortgeleden echter was een onbevredigende nieuwsgierigheid de oorzaak van een bijna-ongeluk: iemand wist via een tandartsenspiegeltje tot de bundel door te dringen. Gelukkig viel er slechts een kleine fractie van het laservermogen gedurende een zeer korte tijd in zijn oog, zodat hij 'met de schrik vrijkwam'.

Na deze gebeurtenis lijkt het nuttig om nogmaals een aantal opmerkingen te maken over het veilig werken met lasers en lasersystemen.

## Laserstraling en het oog.

Omdat ons oog voor laserstraling veel gevoeliger/kwetsbaarder is dan onze huid, beschouwen we in het volgende alleen de effecten van deze straling op het oog. Wellicht ten overvloede tonen we in figuur 1, schematisch, een oogdoorsnede. In figuur 2 geven we de transmissiekromme voor

een oog: als functie van de golflengte zetten we verticaal uit het deel van het op de pupil vallende licht, dat daadwerkelijk het netvlies bereikt.

Wat wij het 'zichtbare licht' noemen is de electromagnetische straling met golflengte binnen het interval van globaal 0,4 tot 0,8  $\mu\text{m}$ . Deze straling is in staat de in het netvlies aanwezige detectoren (kegeltjes en staafjes) te activeren. Voor dit golflengtegebied is het oog een zéér gevoelig waarnemingsinstrument. Om een indruk te geven: alle lichtenergie, die we gedurende ons gehele leven gebruiken om te kijken, is nauwelijks voldoende om 1 cc. water 1 graad te verwarmen (zie Appendix 1).

Het licht, dat tot het netvlies doordringt en daarin wordt geabsorbeerd, zal door de werking van de ooglenzen op een klein brandvlekje worden gefocuseerd. In een ongunstig geval kan zo de vermogensdichtheid daar tot een factor  $10^6$  groter zijn dan ter plaatse van de pupil. Een brandgaatje in het netvlies kan het resultaat zijn. Straling met een golflengte korter dan 0,3  $\mu\text{m}$  dan wel langer dan 3  $\mu\text{m}$  wordt in het hoornvlies geabsorbeerd met als mogelijk gevolg oppervlakteverbranding. In de overgangsgebieden (globaal van 0,3 tot 0,4  $\mu\text{m}$  en van 0,8 tot 3  $\mu\text{m}$ ) dringt de straling wel verder door in het oog en kunnen bij te hoge intensiteiten nare defecten optreden, zoals lenstroebelings (staar). Zie ook de literatuur (2), (3) en (4).

## Wat maakt de laser zo bijzonder?

Reeds kort na de eerste publicaties in 1960 over de robijnlaser en de HeNe-laser ver-

schenen er populair-wetenschappelijke artikelen, waarvan ik mij enkele titels herinner: 'De Zon Overtroefd' en 'Heisser als tausend Sonnen'. Er werd dus vergeleken met onze belangrijkste stralingsbron.

*Het Zonlicht:*

De door de zon uitgezonden straling benadert die van een gloeiende bol (eigenlijk 'zwarte straler') op zo'n 6200°C. We hebben dan te maken met een breed, continu spectrum (fig. 3) met een maximum intensiteit bij 0,48 µm. Het licht wordt uitgezonden in alle richtingen. Op onze breedte op zeeniveau ontvangen we op een wolkloze middag gemiddeld ~1 mW/mm<sup>2</sup> van de zon. Als de pupil zich op zo'n heldere dag heeft vernauwd tot de minimale doorsnede van 2 mm, stroomt er ~3,2 mW vermogen ons oog binnen als we 'recht in de zon kijken'. De zonneschijf zien we onder een hoek van  $\frac{1}{108}$  rad. De geometrische af-

stand lens - netvlies is ~22 mm, en, gecorrigeerd voor de brekingsindex  $n=1,336$  van het glasachtig lichaam is dat ~17 mm. De projectie van de zonneschijf op het netvlies is dus een beeldvlekje met een diameter  $\sim \frac{1}{108} \times 17 \text{ mm} = 0,16 \text{ mm}$ .

Zou bij het naar-de-zon-kijken al het op de pupil vallende zonlicht ook werkelijk het netvlies bereiken, dan zou men in het beeldvlekje daar een vermogensdichtheid vinden van  $(\frac{2 \text{ mm}}{0,16 \text{ mm}})^2 \times 1 \text{ mW/mm}^2$   
 $= 160 \frac{\text{mW}}{\text{mm}^2}$ . Wij schatten dat de gemiddelde transmissie ongeveer 50% is, zodat de,

op het beeldvlekje heersende, vermogensdichtheid ~80 mW/mm<sup>2</sup> zal zijn. Uit ervaring weten wij, dat recht-in-de-zon-kijken onaangenaam is. Gebeurt dit bij toeval, dan sluiten we in een reflexbeweging de ogen. De reflex tijd wordt gewoonlijk op 0,1 sec. gesteld, zodat er dan plaatselijk ongeveer 8 mJ/mm<sup>2</sup> aan energiedichtheid wordt overgedragen. Dit veroorzaakt wel de bekende nabeelden, maar nog lang geen blijvend oogletsel.

*Het Laserlicht:*

Geheel anders dan de zon is een werkende laser een bron, die een nauwe (bijna evenwijdige) lichtbundel uitzendt. Het uitgezonden licht is monochromatisch (vrijwel één golflengte) en coherent (de lichtgolven in de bundel zijn onderling 'in fase'). We beschouwen nu een 'onschuldige' He-Ne-laser, die een maximum vermogen van 1 mW continu kan uitzenden. De golflengte is 632,8 nm. In de laatste Laser Focus Buyers Guide vind ik zo'n meetlaser met bundeldoorsnede 0,7 mm vlak voor de laserkop en een bundeldivergentie 2.0 = 1 mrad. Op 1,3 m afstand voor de laserkop is de bundeldiameter juist 2 mm, en dus kan het volle laservermogen van 1mW een helder-daglicht geadapteerd oog binnenvallen en door de lens worden gefocusseerd op het netvlies. Het brandvlekje daar heeft een diameter van ~10 µm (zie Appendix 2). Daar de transmissie voor de onderhavige golflengte ~85% is, levert dit alles op het netvlies plaatselijk een vermogensdichtheid ~10.800 mW/mm<sup>2</sup>.

Een samenvatting van de bovengenoemde getallen:

Lichtbron	De pupil binnentredend vermogen	Berekende vermogensdichtheid op het netvliesbeeldschijfje
ZON	3,2 mW	80 mW/mm <sup>2</sup>
HeNe-LASER	1, mW	10.800 mW/mm <sup>2</sup>

Dus: hoewel het vermogen, dat de pupil binnentreedt in het geval van de zon hier ongeveer drie maal hoger is dan bij de laser, blijkt tóch de vermogensdichtheid plaatselijk op het netvlies ruim twee ordes groter bij onze laser dan bij zonnestraling.

### Analyse van risico's verbonden aan het gebruik van lasersystemen.

Door de coherentie van het laserlicht kunnen er plaatselijk hoge vermogensdichtheden ontstaan door interferentieverschijnselen, bijvoorbeeld bij reflectie of verstrooiing. Ook niet-lineaire interacties en andere optische effecten kunnen voor onaangename effecten zorgen.

Door de nauwheid van de laserbundel kan ook op grote afstand van deze bijzondere lichtbron nog plaatselijk een hoge vermogensdichtheid optreden. Het is dus zaak alle mogelijke risico's tijdig en goed te analyseren.

Bij moderne laser-productiemachines of laser-meetsystemen heeft de gerenommeerde leverancier naar beste weten en kunnen de veiligheid van operateur en mogelijke omstanders gewaarborgd. Echter: in geval van enige storing zal de betrokken operateur geneigd zijn zélf het euvel op te sporen en te verhelpen. Dan is een zorgvuldige analyse van het systeem noodzakelijk om mogelijke ongelukken te voorkomen. Ditzelfde geldt uiteraard in uitgebreidere mate, wanneer men zelf een systeem samenstelt uit een gekochte laser en losse mechanische en elektrische onderdelen. De analyse moet niet alleen betrekking hebben op de laserstraling zelf, maar ook op andere mogelijke bronnen van ongelukken. Hiervan noemen we slechts twee voorbeelden: de — soms hoge — elektrische spanningen, en de giftige dampen, die kunnen vrijkomen bij het snijden van een aantal kunststoffen.

Om U te helpen bij die analyse geven wij hier een 'check-list', een opsomming van mogelijke risicobronnen, vergezeld van enig commentaar.

- 1 - *Gebruiksaanwijzing*: In vrijwel alle gevallen zal de leverancier van een lasersysteem een gebruiksaanwijzing bijleveren. Lees deze zeer zorgvuldig!
- 2 - *Electrische spanningsbronnen en -geleiders*: Hiervoor gelden de regels, die voor iedere elektrische installatie gelden. Flitslampen vragen vaak spanningen van enkele kV, gasontladingslasers soms spanningen van enige tientallen kV. Zijn alle toevoerdraden goed geïsoleerd en soldeerpunten van verbindingpunten adequaat afgeschermd? Om bijvoorbeeld de gasontlading van een CO<sub>2</sub>-laser in toom te houden, wordt een ballastweerstand in de keten opgenomen. In het verleden zijn ballastwestanden wel eens zo heet geworden, dat zij brand veroorzaakten.
- 3 - *Röntgenstraling* afkomstig van de hoogspanningsvoeding, is soms mogelijk en dient afgeschermd te worden.
- 4 - *Ozon* kan gevormd worden bij sproeien van geleiders op hoogspanning. Daarbij kan ook nog
- 5 - *UV-straling* gegenereerd worden. (Bedenk: Ozon kan men ruiken, UV-stralen kan men niet zien).
- 6 - *Flitslampen*: deze kunnen exploderen; zorg dus voor adequate afscherming van de omgeving.
- 7 - *Spoelgassen* voor lasers, in het bijzonder hoogvermogen-lasers of laser-processen. Zijn deze gassen brandbaar of giftig?
- 8 - *Koelvloeistoffen*: Vloeibare stikstof is 77K (-196°C), dus niet aankomen! Vele kunststoffen worden bros en zeer breekbaar bij deze lage temperatuur.
- 9 - *Vaste stoffen*: Bij bewerkingen als boren, snijden, lassen, solderen, oppervlakte-harden etc. kunnen dampen ontstaan, die
  - de gezondheid schaden (prikkeling van ogen, van longen, giftig, cancerogene...),
  - met de omringende lucht een brandbaar of zelfs explosief mengsel vor-

- men,  
- chemisch actief zijn en machine-onderdelen aantasten.
- 10 - *Mechanische onderdelen*: Snelbewegende delen, zoals draaiende spiegels, choppers etc., kunnen losraken of breken. Worden de wegslingerende delen met voldoende zekerheid binnen hun behuizing gehouden?
- 11 - *Falende apparatuur*: In een groot systeem zal alles ingebouwd en zó afgesloten zijn, dat bij het openen de veiligheidsschakelaars op deuren en panelen het systeem doen uitschakelen. Bedenk, dat zo'n schakelaar wel eens kan uitvallen. Ook is het wel eens gebeurd, dat een flitslamp (door een defect in een stuurkast) een ongewilde lichtpuls gaf en zo de laser liet werken.
- 12 - *Falende mensen*: Ook een mens is maar een mens en kan fouten maken, vooral bij routine-handelingen. Bedenk, dat een menselijk oog géén UV- of IR-laserlicht waarneemt en ook niet ziet, of een onderdeel onder spanning staat. Ook een heet onderdeel tot 400 à 450°C ziet er net zo uit als één op kamertemperatuur. En bedenk ook, dat vele mogelijk schadelijke dampen of gassen geen geur of kleur hebben.

### **Over veiligheidsvoorschriften met betrekking tot het gebruik van lasers en lasersystemen.**

Bovengenoemde analyse leidt als vanzelf tot een aantal primaire regels of voorschriften, waaraan zal moeten worden voldaan. We vinden ze terug in de literatuur (5) t/m (9).

Een samenvatting van de spelregels, waaraan moet worden voldaan bij het werken met lasers/lasersystemen:

- 1 - De ruimte, waarin zich een lasersysteem bevindt, dient duidelijk aangegeven te worden door een verlicht bord met het woord LASER. Ook het lasersysteem zelf dient duidelijk gemarkeerd te worden.
- 2 - Het in bedrijf stellen van een lasersysteem zij alleen mogelijk door gebruikmaking van een sleutelschakelaar, waarbij alleen het geïnstrueerde personeel over de sleutel beschikt.
- 3 - Het lasersysteem moet ingebouwd zijn in een beschermende omhulling, die voorkomt, dat met name het menselijk lichaam of deel daarvan (ogen!) wordt blootgesteld aan laserstraling.
- 4 - Deze omhulling dient afgesloten te zijn met veiligheidssloten, die bij openen van de omhulling de laserstraling uitschakelt.
- 5 - Er dient een indicator aanwezig te zijn, die een zichtbaar en/of hoorbaar signaal geeft, wanneer de laser in bedrijf is.
- 6 - Als de laser wel in werking is, maar niet effectief gebruikt wordt, verdient het aanbeveling, het bundelvermogen óf te verzwakken tot beneden de gevarengrens (zie Appendix 3), óf de bundel op te vangen in een (gekoelde) warmtecollector.
- 7 - De bedieningskast met -paneel dient gescheiden te zijn van het actieve laser(bundel)volume.
- 8 - De waarnemingsoptiek dient beveiligd te zijn door kleppen, sluiters of lichtverzwakkers. Bij hoge laservermogens dient men bij voorkeur gebruik te maken van een gesloten TV-systeem.
- 9 - Waar een bundel wordt gestuurd door spiegels, prisma's, fibers of andere optische middelen, dient, ingeval van weigering van één van deze stuurmiddelen, de bundel verzwakt tot beneden de gevarengrens, resp. uitgeschakeld te worden.
- 10 - Het verdient aanbeveling, een afzuigmogelijkheid aan te brengen ter verwijdering van de bij de laserbewerking mogelijk ontstane dampen, gassen of stofdeeltjes, zeker indien ze nadelig zijn voor de gezondheid. Ook kan er in een enkel geval een explosief mengsel ontstaan. Hoewel de hoeveelheden

van deze vluchtige bestanddelen over het algemeen gering zijn, dient men toch te overwegen, of zij zondermeer in de buitenlucht geloosd mogen worden, in verband met milieu-eisen

- 11 - Voor veel lasers is een hoogspanningsvoeding nodig. Daarbij kan röntgenstraling of een HF-electromagnetische straling optreden. De hoogspanning zowel als genoemde stralingen dienen op adequate wijze te worden afgeschermd.

Tenslotte nog het volgende: moet men voor een grote ingreep (een reparatie of wijziging) tijdelijk met een geopend systeem werken, zodat er gedurende die tijd een onveilige situatie kan ontstaan, dan dient men deze grote ingreep bij voorkeur uit te voeren in een geheel omsloten en afsluitbare ruimte, die duidelijk is gekenmerkt door verlichte waarschuwingsborden. Dit om te voorkomen, dat onbevoegd personeel (per abuis) binnenloopt. De muren van deze laserruimte dienen vlak te zijn en geverfd in lichte kleur. Het lichtniveau dient er hoog te zijn (om de pupil zo nauw mogelijk te houden). Reflecterende oppervlakken van hulpapparatuur dienen vermeden te worden. De ingreep in het lasersysteem dient te geschieden door een specialist, goed bekend met lasereigenschappen en stralingsgevaaren.

### **De indeling van lasers in gevarenklassen.**

Nederland kent nog geen wettelijke voorschriften of normen aangaande lasers en laserstraling. Wel is er een uit 1978 daterend rapport van de Gezondheidsraad (5), dat het lasergebied omvat. Het rapport wordt momenteel herzien. Ook zijn er in ons land enige ontwerpnormen uit 1985 (6).

Het ontberen van definitieve normen hangt samen met de complexiteit van het probleem. In Duitsland heeft men wel DIN-normen (7). Het ANSI (American National Standard Institute) heeft in 1980 een inde-

ling naar gevarenklassen opgesteld. Twee jaar later werd deze klasse-indeling overgenomen door de WHO (World Health Organisation). Deze klassen, genummerd I tot en met IV zijn:

- *Klasse I*, de nul-risicoklasse: géén oogschade bij normaal gebruik gedurende een normale werkdag.

- *Klasse II*, de lage-risicoklasse: de natuurlijke reflex (ogen sluiten) zorgt voor beperkte instraling. Het resultaat wordt vergelijkbaar geacht met enkele minuten in de zon kijken.

Grosso modo omvatten deze beide klassen samen de lasers met maximaal 1 mW uitgangsvermogen. De laser gebruikt in detectie- en meetsystemen vallen vrijwel alle in klasse I en soms in II. Aan deze systemen worden zelden bijzondere veiligheidseisen opgesteld.

- *Klasse III*, de midden-risicoklasse: oogbeschadiging is mogelijk binnen de reflex-tijd.

- *Klasse IV*, de hoge-risicoklasse: grote kans op verbranding van huid, kleding, voorwerpen in de omgeving, ook explosiegevaar. Deze klasse omvat alle lasers met vermogen groter dan 500 mW.

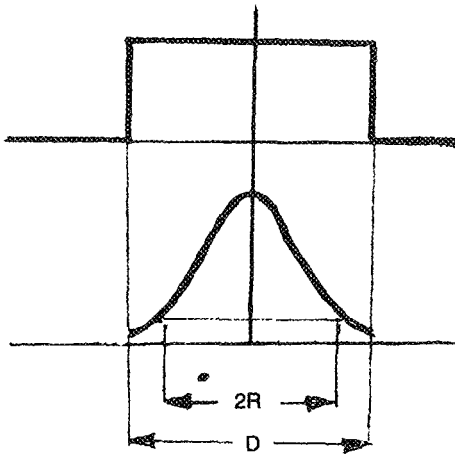
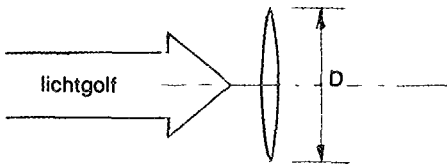
Het ligt voor de hand dat in het bijzonder lasers uit de klassen III en IV veilig moeten worden opgesteld. Het gebruik van een veiligheidsbril toegesneden op de gebruikte laser dient overwogen te worden, evenals werkkleding, die met een brandvertragend middel is geïmpregneerd.

### **Appendix 1.**

R.W. Pohl rekent ons in zijn bekende en fraaie leerboek "Optik und Atomphysik" voor, dat 'nachtzien' nog mogelijk is bij een minimale lichtstroom door onze pupil van  $3 \times 10^{-17}$  Watt. Dit komt overeen met ongeveer 100 lichtquanta per seconde. Nu is de lichtstroom door onze pupil gedurende de dag gemiddeld een factor  $10^7$  hoger: dus ongeveer  $3 \times 10^{-10}$  Watt. Het 'kijkleven' van een mens is ongeveer  $2,5 \times 10^9$  sec. (78 jaar, 16 uur per dag). Zo komen we tot een totale kijkenergie, die gedurende

een heel mensenleven de pupil bin-  
nenstroomde, van  $(3 \times 10^{-10} \text{ Watt}) \times$   
 $(2,5 \times 10^9 \text{ sec.}) = 0,75 \text{ J} = 0,18 \text{ cal.}$

## Appendix 2.



*Geval a:* van links valt een vlakke mono-  
chromatische golf (golflengte  $\lambda$ ) van unifor-  
me intensiteit op een dunne lens (diameter  
 $D$ , brandpuntsafstand  $f$ ). Deze lens zal het  
licht focuseren tot een brandvlekje met  
diameter  $d_A = 2,44 \frac{f \cdot \lambda}{D}$ .

Airy berekende deze diameter voor een op-  
tisch systeem vrij van alle aberraties en al-  
leen beperkt door buigingsverschijnselen  
(vandaar 'diffraction-limited').

*Geval b:* valt er centraal op de lens een la-  
serbundel met een Gaussische intensiteits-  
verdeling  $I(r) = I(0) \cdot \exp -2 \left(\frac{r}{R}\right)^2$  [ $I(0) =$  in-  
tensiteit op de as van de bundel en  
 $r =$  afstand tot die as] en is de lensdoorsne-  
de  $D \geq 2R$  dan krijgen we een brandvlekje  
met een iets kleinere diameter  $d_G =$   
 $1,72 \cdot \frac{f \cdot \lambda}{D}$ .

Voor  $D = 2 \text{ mm}$ ,  $\lambda = 632,8 \text{ nm}$  en  $f = 17 \text{ mm}$   
berekenen we  $d_A \approx 13 \mu\text{m}$  en  $d_G \approx 10 \mu\text{m}$ .

## Appendix 3.

Gevarengrens, toelaatbare bestralingsni-  
veaux voor het lasergolflengtegebied  
200-1400 nm.

	OOG	HUID
<i>Reuzenpuls laser</i> pulsduur 1 ns - 1 $\mu\text{s}$	$5 \times 10^{-8} \text{ J/cm}^2$	0,1 j/cm <sup>2</sup>
<i>Gepulste laser</i> pulsduur 1 $\mu\text{s}$ - 0,1 sec.	$5 \times 10^{-7} \text{ J/cm}^2$	0,1 J/cm <sup>2</sup>
<i>Continue laser</i> 0,1 sec	$5 \times 10^{-6} \text{ W/cm}^2$	0,1 W/cm <sup>2</sup>