

Klasse-indeling lasers schiet te kort

W. Zwaard, J. Mossink

Methoden om de risico's van een laser-opstelling te evalueren, zijn nog maar weinig uitgewerkt. Soms biedt een indeling in risicoklassen perspectief. Voor lasers in industrie en research-laborato-

ria is zo'n benadering minder zinvol. Wat zijn de risico's van lasers en welke maatregelen kunnen worden genomen om die risico's te beheersen?

Lasers zijn niet meer weg te denken uit de dagelijkse werkomgeving. In de (wegen)bouw wordt de laser gebruikt als geavanceerd meet- en controle-instrument waarmee nauwkeurig hoeken en afstanden kunnen worden gemeten. Medici maken er in de oog- en tandheelkunde gebruik van. En dan zijn er nog talloze andere toepassingen van lasers; van thuis (CD-speler) tot in de supermarkt (barcode-scanners) en bij de telecommunicatie (optische vezels). In de arbeidssituatie ligt de tijd achter ons waarin slechts enkele gespecialiseerde medewerkers met lasers werken. De risico's van blootstelling aan de straling van lasers betreffen veelal kort durende en onbedoelde blootstelling. De laser-problematiek is van oudsher vooral veiligheidskundig van karakter. De toepassing van lasers in het bewerken van materialen introduceert ook typisch arbeidshygiënische knelpunten.

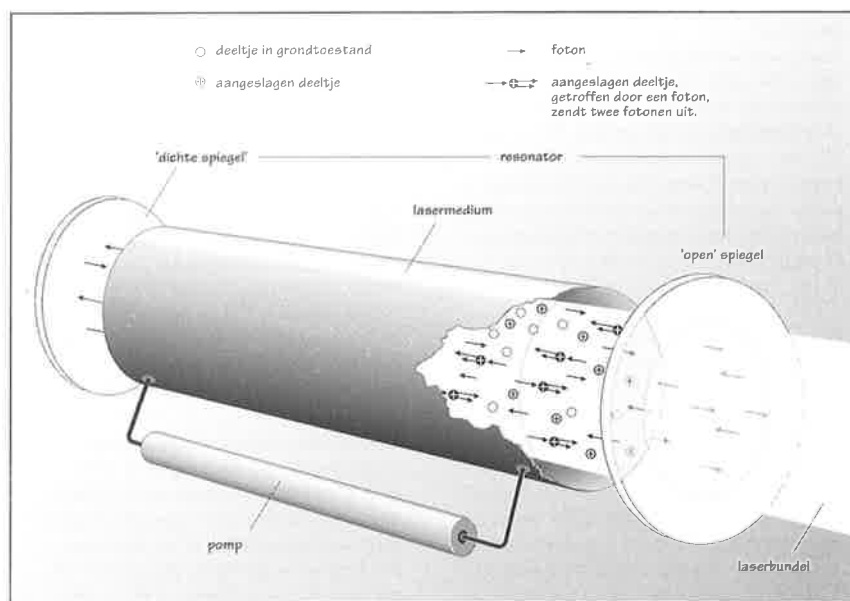
Een indeling van lasers in risicoklassen is vooral nuttig om een ruw beeld te krijgen en om bijvoorbeeld prioriteiten te stellen in een (overheids)beleid. Ook binnen de produkt-veiligheid biedt het perspectieven.

Voor lasers in onderzoekslaboratoria en industrie, waar veel opstellingen zelf gebouwd (of sterk aangepast) zijn of 'custom-made', levert zo'n indeling minder op.

Door de trend naar groter wordende vermogens valt een gebruikelijke laseropstelling al snel in de hoogste risicoklasse. Bovendien zijn de risicoklassen uitsluitend gebaseerd op stralingsrisico's; andere risicotypen blijven buiten beschouwing.

Laboratoria en industrie

De toepassing van lasers in (chemische) laboratoria neemt nog steeds toe. Een chemicus kan met een laser ongelooflijk subtiel en selectief werken zoals blijkt uit de diverse vormen van laserspectroscopie: met gepulste lasers kunnen (snelle) processen op



De werking van de laser (illustratie EPS).

moleculaire of atomaire schaal worden bestudeerd.

Karakteristiek voor het gebruik van lasers in laboratoria is het grote aantal zelf gebouwde opstellingen. Aan de commercieel verkrijgbare laser worden vaak talloze modificaties aangebracht. Niet zelden ontstaat zo laser-apparatuur die nog maar weinig lijkt op de door de fabrikant geleverde spullen. In het onderzoek verandert de situatie bovendien niet zelden van de ene dag op de andere. De onderzoeker bedenkt 's morgens een nieuw experiment, past de opstelling aan en gaat daar 's middags mee aan de slag. De 'tijdelijke' aanpassingen krijgen nogal eens een semi-permanent karakter wanneer vervolgonderzoek wordt bedacht.

In laboratoria vindt het werken met lasers meestal plaats in een aange-

paste laboratoriumruimte. De aanpassingen van de ruimte (ten opzichte van een standaard-laboratorium) blijken in de praktijk sterk uiteen te lopen.

In de industriële omgeving heeft men met andere laser-opstellingen te maken. Niet alleen zijn de vermogens hier vaak hoger, de opstellingen hebben er ook een meer permanent karakter.

De industrie gebruikt lasers voor verschillende vormen van materiaalbewerking. De belangrijkste zijn snijden, boren en lassen.

Lasersnijden is mogelijk voor uiteenlopende materialen. De meeste metalen (uitgezonderd koper en edele metalen) zijn nauwkeurig te snijden; staal tot een dikte van 10 mm, aluminium tot circa 4 mm. Ook kunststof- ▶

fen, papier, textiel en leer lenen zich goed voor snijden met lasers.

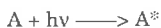
Boren met lasers is aantrekkelijk wanneer met grote nauwkeurigheid kleine gaten moeten worden gemaakt; nabehandelingen achteraf zijn niet nodig. Bij laserlassen kunnen zowel puntlassen als naadlassen met een hoge precisie worden gemaakt. Voorbeelden zijn precisie-lassen van kleppen en lassen van onderdelen van beeldbuizen. Naast deze technieken zijn oppervlakbehandelingen, zoals harden en legeren in ontwikkeling.

De meeste bewerkingen vinden

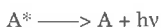
De laser

Een laserbundel bestaat uit licht van één golflengte, wordt over grote afstand nauwelijks wijder en heeft een hoge energiedichtheid. Daarom is het mogelijk om energie te concentreren op een kleine oppervlakte. Dat laatste wordt versterkt met behulp van convergerende optische instrumenten ('focuseren'). Daardoor kan de vermogensdichtheid in het brandpunt nog sterk oplopen.

Het woord 'laser' is een acroniem voor Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Het principe, gestimuleerde emissie, werd al in 1917 door Einstein beschreven: het is het uitzenden van een foton onder invloed van een foton van dezelfde energie. Dat klinkt wat raadselachtig, maar het principe is eenvoudig: als een deeltje (atoom of molecuul) een grondtoestand A heeft en een aangeslagen toestand A*, kan vanuit A absorptie plaats vinden van een foton (hv) van precies de goede energie:



Zo'n deeltje in aangeslagen toestand kan terugkeren naar zijn grondtoestand onder emissie van een zelfde foton:



Dit is in de regel een 'spontaan' proces. Hoe snel of efficiënt dat proces plaats vindt, wordt door fysici uitgedrukt in een 'overgangswaarschijnlijkheid'. We kunnen nu op papier ook een ander proces bedenken: Stel dat het deeltje in aangeslagen toestand getroffen wordt door een 'passend' foton. Dan kunnen

plaats in speciaal ingerichte bewerkingsstations. De vorm en grootte hiervan is afhankelijk van de bewerking, de aard en omvang van de werkstukken en de toegepaste apparatuur.

Hoge energie

De bekendste risico's van lasers hangen samen met blootstelling van het

lichaam aan de laserbundel. Voor een risico-evaluatie kan deze worden opgevat als een 'gewone' lichtbundel met een hoge energie (vermogensdichtheid) die nauwelijks divergeert. De straling ligt meestal in het zichtbare of infrarode deel van het elektromagnetische spectrum. De indringdiepte van deze straling in het menselijk lichaam is gering en de meest kwetsbare organen zijn daarom ogen en huid.

Als een laserbundel weefsel treft, kunnen beschadigingen ontstaan door verbranding of fotochemische

we ons voorstellen dat het volgende proces plaats vindt:



Einstein berekende dat dit proces ('gestimuleerde emissie') een relatief hoge overgangswaarschijnlijkheid heeft. Anders gezegd: overgangen van aangeslagen niveaus naar de grondtoestand worden *gestimuleerd* door resonante straling. Bovendien bleek dat de door stimulatie vrijkomende straling dezelfde richting, frequentie en fase heeft als de opvallende straling.

Gebaseerd op dit principe, kunnen we nu in gedachten als volgt een laser construeren: We nemen een buis met aan weerszijden twee spiegels. Tussen die twee spiegels laten we een foton heen en weer kaatsen. Nu zorgen we, via een proces dat bekend staat als 'pompen', dat in de buis voldoende aangeslagen deeltjes (A*) aanwezig zijn waarvan het energieverval tussen aangeslagen toestand en grondtoestand gelijk is aan de energie van het foton. Elke keer als het foton een aangeslagen toestand tegenkomt, kan er een tweeling-foton ontstaan. De twee fotonen kunnen weer vier fotonen vormen, etc. Zo ontstaat een lawine fotonen, perfect gelijk in fase en golflengte, die heen en weer reflecteren tussen de spiegels. Door nu één van de spiegels *niet perfect* reflecterend te maken, lekt er af en toe wat straling naar buiten: de laserbundel is geboren. Het zal duidelijk zijn dat het in de praktijk nog niet zo eenvoudig is. Het heeft in feite tot 1960 geduurd voordat de principes van Einstein waren vertaald naar de praktijk en de eerste werkende laser het licht zag. ■

effecten. Bij kort durende intense straling kan het weefsel plaatselijk gaan koken en ontstaan beschadigingen door de ontstane drukopbouw. Straling met voldoende energie (zoals UV-straling) kan fotochemische reacties teweeg brengen. Een voorbeeld uit het dagelijks leven is de bruinkleuring en versnelde veroudering van de huid door zonlicht. Deze effecten

zijn vooral van belang bij langdurige blootstelling.

Het oog is transparant voor straling met een golflengte tussen 400 en 1400 nm zodat laserbundels in dit golflengte-gebied het netvlies kunnen beschadigen. Dit kan leiden tot blijvende vermindering van het gezichtsvermogen. Kleine beschadigingen herstellen soms volledig; buiten het centrale gezichtsveld worden zij vaak niet eens opgemerkt. Een ander effect is de opwarming van het oog door de straling, waardoor vertroebeling van delen van het oog ontstaat. Blootstelling van het hoornvlies aan UV-straling leidt tot fotokeratitis (lasogen). Bovendien kan UV-straling een vertroebeling van de ooglenzen (staar) veroorzaken. Straling met een golflengte beneden 400 nm of boven 1400 nm kan hoornvliesverbranding teweeg brengen. Deze beschadigingen zijn pijnlijk maar genezen doorgaans snel.

De huid is minder kwetsbaar.

Nd:Glas en Robijn-lasers (zie kader p. 438) veroorzaken door hun beperkte vermogen slechts brandwonden als de huid zich dicht bij het brandpunt bevindt. CO₂-lasers en Nd:YAG lasers zijn door hun grotere vermogen gevaarlijker. Door diepe inbranding genezen de ontstane wondjes slechts langzaam maar uiteindelijk volledig. In de praktijk wordt wel gebruik gemaakt van het begrip Maximaal Toelaatbare Blootstelling (MTB). Deze wordt uitgedrukt in J/m² (of W/m²) en is onder meer afhankelijk van blootstellingsduur en golflengte van de straling.

Spanning

Hoewel de energierijke laserbundel het meest in het oog springende aspect van een laser-opstelling is, zijn ook andere risico's van belang. Zo maken lasers gebruik van hoge elektrische spanningen (5-25 kV). Hoogspanningsopwekkingseenheden, condensatorbanken en elektroden van resonator- en flietsbuizen voeren een hoge spanning. De condensatoren kunnen hun lading nog lang behouden na het uitschakelen van de voedingspanning, zodat het risico van een elektrische schok ook na uitschakelen bestaat. In de literatuur beschreven ongevallen met lasers, met name de ernstige gevallen, blijken veelal elektrocutie te betreffen. Bij het gebruik van spanningen van 15 kV of hoger is bovendien het mogelijk vrijkomen van röntgenstraling van belang. Daarnaast wordt vaak gebruik gemaakt van zeer toxische gassen

(fluor en chloor bij excimeer lasers), carcinogene kleurstoffen (bij dye lasers; zie kader) en van cryogene vloeistoffen. Het gebruik van deze vloeistoffen, meestal vloeibare stikstof, vormt een risico voor de onbeschermde huid en vereist afdoende ventilatie bij het tappen.

Wanneer de golflengte van de gebruikte straling in het ultraviolette deel van het spectrum ligt, is bovendien het ontstaan van ozon van belang. Ozon kan worden gevormd uit zuurstof in de lucht onder invloed van UV-straling en werkt sterk prikkelend op ogen en slijmvliezen.

Tabel 1. Risicotypen bij het industrieel bewerken van materialen met lasers

risicotype	laserbundel	apparatuur	bewerking
straling	(gefocusseerde) bundel	begeleidende (röntgen-)straling	pluimstraling black-body straling
elektriciteit		elektroden; condensatoren	
hoge/lage druk		gascilinders	procesgassen
hoge/lage temperatuur		cryogenen; hete onderdelen	heet materiaal
toxische stoffen	ozon	fluor; chloor; carcinogene kleurstoffen	verdamping/ ontleding materiaal
brand/explosie	materiaal in omgeving	resonatoren; flitsbuizen; condensatoren	te bewerken materiaal
mechanische risico's		bewegende delen (XY-tafels; robotarm)	wegspattend materiaal

Maar er is meer; zelfs geluidbelasting blijft de laserwerker niet bespaard. Sommige (puls)lasers maken zoveel herrie dat geluidbeperkende maatregelen of het dragen van gehoorbeschermingsmiddelen noodzakelijk is.

Bij het industrieel bewerken van materialen spelen nog andere risico's een rol. De te bewerken materialen worden veelal verhit tot boven het smeltpunt of zelfs kookpunt zodat toxische stoffen kunnen vrijkomen. Bij lassen overheersen de stralingsrisico's. Zowel gereflecteerde straling als 'pluimstraling' zijn van belang. Het lasproces vereist dat zo weinig mogelijk materiaal verdampt. Er komen daarom nauwelijks toxische stoffen vrij.

Bij het bewerken van materialen stuurt numeriek bestuurd apparaat de bundel vaak over het te bewerken materiaal. De combinatie van robots en lasers brengt specifieke

risico's met zich mee. Onverwachte reflecties en het gevaar van de (gefocusseerde) bundel bij storing in de robot zijn belangrijk. Het is niet of nauwelijks mogelijk de bundel geheel op te sluiten anders dan door plaatsing van de laserrobot in een aparte ruimte.

Risico-analyse

Door maatregelen te treffen, kan het werken met lasers veilig plaatsvinden. De noodzaak tot actie hangt af van de grootte van de risico's en wordt onder meer bepaald door het uittredend vermogen en de golflengte

van de laser. Een indeling van lasers in risicoklassen maakt het mogelijk om niet alle lasers over één kam te scheren.

Hoewel er in Nederland (nog) geen algemene officiële voorschriften zijn voor het veilig werken met lasers, zijn er talloze richtlijnen beschikbaar waarin de te nemen maatregelen over het algemeen zijn gekoppeld aan de klasse van de laseropstelling. De klasse-indeling is gebaseerd op alleen de stralingsrisico's van de laserbundel.

Daarnaast zijn er verschillende semi-kwantitatieve risico-evaluatie technieken die geschikt zijn om toe te passen op een laseropstelling. Voor industriële toepassingen levert een systematische taakanalyse snel aanknopingspunten evenals een risico-analyse met scenario's. Ook de HAZOP (Hazard and Operability) techniek is voor laseropstellingen in zowel laboratoria als industrie een nuttig hulp-

middel. De toepassing van deze technieken op laseropstellingen staat momenteel nog in de kinderschoenen.

Risicobeheersing

De *basis-strategie* voor risicobeheersing is een handreiking voor het beheersen van alle risico's die aan een laser-opstelling kleven. De strategie begint met maatregelen aan de bron en eindigt met het toepassen van persoonlijke beschermingsmiddelen.

Elimineren van de risico-bron is bij industriële materiaalbewerkingen mogelijk wanneer volwaardige alternatieven bestaan voor de laser. De keuze van bewerkingsmethode vindt doorgaans plaats na afweging van technische en economische factoren. Het verdient aanbeveling om een evaluatie van de veiligheids- en gezondheidsrisico's hiervan deel te laten uitmaken.

Is de laser onmisbaar, dan kan het *aanpassen van de risicobron* risico-verlagend werken. De risico's worden bepaald door uittredend vermogen, doorsnede en divergentie van de bundel en de golflengte van het licht. Wanneer men kan kiezen, verdient langgolelige straling (in het zichtbare gebied) de voorkeur. Vaak zal de golflengte echter worden bepaald door de eisen die onderzoek of bewerkingsmethode stellen. Het uittredend vermogen verdient dan de aandacht. Werken bij een lager vermogen verkleint de risico's evenals de noodzaak van later te treffen maatregelen (zo is het verstandig om bij het 'uitlijnen' van de laser bij laag vermogen te werken).

Bij industriële bewerkingen zijn de gebruikelijke vermogens vaak hoog. Ook hier heeft de keuze van het type laser invloed op de risico's. Nd:YAG-lasers zijn door hun golflengte (UV-straling) en excimeer-lasers door de gebruikte gassen (fluor, chloor) bijzonder risicovol.

De instelling van de operatie-parameters is van invloed op zowel de stralingsrisico's als de emissie van toxische stoffen. Een juiste instelling bij snijden beperkt de emissies bij lasersnijden en geeft bovendien een optimaal snijresultaat. Ook het gebruik van een waterstraal in plaats van een snijgas heeft een gunstige invloed op de emissie.

In het ontwerp van de apparatuur verdient het aanbeveling de laserbundel ruim boven of onder ooghoogte te laten lopen en de bundel in verticale richting te laten uittreden.

Inkasten

Als aanpassing van de bron niet mogelijk is, moeten we onze toevlucht ►

zoeken in het *isoleren van de risico-bron*; het 'inkasten' van de laser. Vooral wanneer de laser deel uitmaakt van een vaste opstelling, is zo'n omkasting (behuizing) een effectieve manier om de risico's te beheersen. De beste omkasting is er één waarbij ook de bundel zelf helemaal is 'ingepakt'. Als de bundel wél buiten de omkasting kan treden, kan gereedschap (scharen, schroevendraaiers) in de bundel voor verraderlijke reflecties zorgen. Inkasten is niet altijd mogelijk. Het opvangen van de bundel met een bundelvanger is dan nuttig.

Om te voorkomen dat laserbundels 'toegankelijk' zijn, dienen aangebrachte afschermingen niet verwijderd te kunnen worden zonder dat de laser is uitgeschakeld of de intensiteit naar een veilig niveau is teruggebracht.

Een maatregel van lagere prioriteit is het *aanpassen van de omgeving*. De omgeving, de werkruimte, kan op diverse manieren de risico's van de laser beïnvloeden, in negatieve en in positieve zin. De afwezigheid van reflecterende wanden of voorwerpen is noodzakelijk.

De werkplekinrichting levert ook een belangrijke bijdrage aan verkleining van andere risico's. Te denken valt aan een goed gekozen plaats voor de afzuiging van toxische stoffen of aan een zodanige lokatie van de operator-werkplek dat toevallig optredende reflecties of uittrekkende bundels de operator niet treffen.

Lokale afzuiging is een effectief hulpmiddel om vrijgekomen stoffen af te voeren en blootstelling te verminderen. Dit is vooral mogelijk bij het snijden van vlakke plaatmaterialen. Bij 3D-snijsystemen en laserrobots is plaatselijke afzuiging minder goed mogelijk.

Controlekamers

In het verlengde van het voorgaande verdient de *afscherming van de mens* de nodige aandacht. Ook dat is met bouwkundige voorzieningen te realiseren. De afscherming van de mens kent twee aspecten, afhankelijk van wie 'de mens' is: de werknemer zelf of diens collega's. Om met de laatste te beginnen: het verdient uiteraard aanbeveling om het werken met een laser in een duidelijk aangegeven ruimte te laten plaatsvinden. Zo'n *geclassificeerde ruimte* wordt alleen bevolkt door de mensen die zelf met de laser werken: een duidelijk omschreven groep die goed op de hoogte is van de eigenschappen en risico's van de laseropstelling. De nodige organisatorische maatregelen

Lasers in soorten en risicoklassen

Er is een grote variëteit aan lasers verkrijgbaar. Het uittredend vermogen en de golflengte van de straling zijn belangrijke gegevens. Bij continu lasers is het uittredend vermogen constant in de tijd terwijl bij puls lasers de laserbundel gepulst is. Een ander onderscheid is gebaseerd op het proces van 'pompen'. Een laser kan elektrisch worden gepompt met behulp van hoogspanning of chemisch. Lasers kunnen ook optisch worden gepompt door gebruik te maken van lichtbronnen. De lichtbron die pompt, kan een andere laser zijn of uit dioden bestaan (men spreekt dan van een 'diodelaser'). Aan het materiaal waarin de aangeslagen deeltjes zich bevinden (het 'laser-medium') ontleent de laser zijn naam. Is dit materiaal bijvoorbeeld kooldioxyde, dan spreekt men van een 'CO₂-laser'. Naar de fase van het medium maakt men onderscheid tussen *gaslasers*, *vaste-stoflasers* en *vloeistoflasers*. De meest toegepaste gaslaser (vooral voor lage vermogens) is de helium-neon laser met zijn karakteristieke rode (633 nm) bundel. Voor hogere vermogens is de argon laser populair terwijl voor echt hoge vermogens de kooldioxyde laser met een golflengte in het infrarode deel van het spectrum (10,6 µm) veel wordt toegepast. Bijzondere typen gaslasers zijn excimeerlasers (zoals de krypton-fluor laser) en chemische lasers (bijvoorbeeld de HF laser). De werking van vaste-stof lasers berust vaak op de aanwezigheid van metaalionen zoals Cr³⁺-ionen in Al₂O₃ (Robijn laser) of Nd³⁺-ionen in yttrium-aluminiumgranaat (Nd:YAG laser). Vloeistoflasers hebben een actief medium dat bestaat uit een oplossing van een organische kleurstof (kleurstoflasers of dye lasers). Het grote voordeel van deze lasers is dat men 'meerdere golflengten kan instellen'. Kleurstoflasers zijn met name in research-laboratoria populair. Laser-apparatuur kan ook worden ingedeeld op grond van blootstellingsrisico's. De indeling in risicoklassen is gebaseerd op het uittredend vermogen en de golflengte van de gebruikte straling. De klasse is door de meeste fabrikanten aangegeven op de apparatuur. Klasse 1 omvat de minst gevaarlijke lasers en klasse 4 de lasers met de hoogste risico's. De indeling van de lasers in klassen is het eenvoudigst toe te lichten aan de hand van continu lasers. Het uittredend vermogen van *klasse-1* lasers is zo gering, dat gedurende lange tijd in de bundel kan worden gekeken zonder dat schade aan het oog zal optreden. Dergelijke lasers zijn dus 'intrinsiek veilig'. Voor het veilig werken met dergelijke lasers zijn in feite geen speciale maatregelen vereist. Lasers uit *klasse-2* kunnen schade aan het oog toebrengen, maar slechts wanneer de blootstelling langer dan 0,25 seconde plaatsvindt. De grens van 0,25 seconde is gebaseerd op de oogsluitreflex. Als iemand op het oog wordt getroffen door zo'n bundel biedt de oog-

sluitreflex dus voldoende bescherming. Dat geldt uiteraard alleen voor de zichtbare straling. Klasse 2 omvat dan ook alleen lasers die straling uitzenden in het zichtbare gebied.

Bij een *klasse-3* laser kan blootstelling van het oog aan de bundel, of een reflectie daarvan, schade veroorzaken. Klasse 3 is vaak verdeeld in twee subklassen, 3a 3b, waarbij klasse 3a de minst gevaarlijke lasers omvat. Als bovengrens van klasse 3a wordt in het zichtbare gebied meestal een uittredend vermogen van 5 mW resp. een vermogensdichtheid van 25 W/m² aangehouden. Een bundel van een laser uit klasse 4 kan niet alleen bij blootstelling ernstige schade aan de ogen toebrengen maar ook aan de huid. Bij lasers uit klasse 4 kunnen zelfs diffuse reflecties van de bundel gevaarlijk zijn. Bovendien kan de bundel brand veroorzaken.

Om een idee te krijgen van de vermogens waarom het gaat: de veel gebruikte helium-neon laser zendt licht uit met een golflengte van 632,8 nm. Een He-Ne laser valt in klasse 1 als het uittredend vermogen niet groter is dan 0,4 µW. Tot 1 mW valt de laser in klasse 2. Ligt het vermogen tussen 1 en 5 mW, dan hebben we te maken met een klasse-3a laser en tussen 5 en 500 mW is deze laser klasse 3b. De ondergrens van klasse 4 ligt bij deze golflengte dus bij 500 mW (0,5 W).

dienen met betrekking tot deze groep te zijn genomen. Er moeten bijvoorbeeld duidelijk werkvoorschriften zijn en nieuwe medewerkers moeten worden voorgelicht. De afscherming van de mens kan verder gaan en ook de lasergebruiker zelf betreffen. Controlekamers van waaruit de laser op afstand bediend kan worden, zijn een voorbeeld.

Beperking van de blootstellingsduur beperkt de risico's en is mogelijk door het *aanpassen van de organisatie*. Er zijn een aantal mogelijkheden zoals taakrotatie of automatisering van

veel (zichtbaar) licht doorlaten; anders ziet de laser-gebruiker niets! De meeste brillen laten wat dat betreft nogal wat te wensen over en zijn dan ook weinig populair. Bij het industrieel bewerken van materialen met hoog-vermogen lasers kunnen speciale kleding en handschoenen nodig zijn. De kleding moet van niet-brandbaar materiaal zijn vervaardigd en gedurende enige tijd intact blijven als het door een laserbundel wordt getroffen. Handschoenen dienen te zijn vervaardigd van niet-brandbaar materiaal. Het dragen van handschoenen is

heid voor Research en Onderwijs, 1986.
- J.C.M. Mossink, Werken met Industriële Lasers, S-132, DGA, Den Haag, 1992.
- W. Zwaard, Veilig werken met lasers: een kwestie van gezond verstand, Laboratorium Praktijk, 1988, 464.

Tabel 2. Enkele typische continu lasers

<i>laser medium</i>	<i>karacteristieke golflengte</i>	<i>gebruikelijk uittredend vermogen</i>
He-Ne (gas)	633 nm (rood)	1-1000 mW
Ar (gas)	489 nm (groen)	1-10 W
CO ₂ (gas)	10,6 µm (IR)	0,1-10kW
Nd:YAG (vaste stof)	1064 nm (IR)	0,1-1000 W
kleurstof (vloeistof)	400-1200 nm	1-100 mW

Tabel 3. Enkele typische pulslasers

<i>laser medium</i>	<i>golflengte</i>	<i>duur</i>	<i>puls frequentie</i>	<i>energie</i>
CO ₂ (gas)	10,6 µm		20 kHz	
Nd:YAG (gas)	1064 nm	0,1-1 µs	50 kHz	1 mJ
Robijn (vaste stof)	694 nm	0,03-500 µs	10 Hz	10 J
excimeer (ArF) (gas)	193 nm	20 ns	65 Hz	0,2-0,5 J
excimeer (KrF) (gas)	248 nm	20 ns	65 Hz	0,3-1 J

de bewerking. Een verhoging van de bedrijfszekerheid vermindert de tijd die nodig is om (risicovolle) reparaties uit te voeren.

Door middel van procedures, voorschriften en de organisatie van de werkzaamheden nemen de veiligheids- en gezondheidsrisico's af. De effectiviteit van procedures en voorschriften blijkt overigens niet altijd hoog.

De laatste stap in de strategie is het toepassen van *persoonlijke beschermingsmiddelen*. Voor bescherming tegen laserstraling is een laserbril nodig. Het is van belang dat zo'n bril past bij het type laser dat wordt gebruikt. Dat is te zien aan het transmissie-spectrum van de gebruikte glazen. De bril moet uiteraard in het golflengtegebied van de laser veel straling absorberen. Zo mogelijk moet de bril buiten dat golflengte-gebied

ook nodig bij het hanteren van materiaal in de buurt van de bundel.

De auteurs

Dr. A.W. Zwaard is werkzaam als hoofd Veiligheid en Milieu bij de Gorlaeus Laboratoria van de Rijksuniversiteit Leiden. Ir. J.C.M. Mossink is als technisch ergonoom verbonden aan het Nederlands Instituut voor Praeventieve Gezondheidszorg-TNO in Leiden.

Literatuur

- D. Sliney en M. Wolbarsht, Safety with Lasers and Other Optical Sources, Plenum Press, New York, 1980.
- World Health Organization, Lasers and Optical Radiation (Environmental Health Criteria 23) WHO, Genève, 1982.
- M.J. Suess, Nonionizing Radiation Protection, WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, 1982.
- Interuniversitaire Adviescommissie Veiligheids- en Milieuwetgeving, Werkgroep Stralingshygiëne, Richtlijnen Laserveilig-