

S 132.4
S 132

SZW

Ministerie van Sociale Zaken
en Werkgelegenheid

2^e ex.

Werken met industriële lasers

Een verkennende studie naar veiligheids- en
gezondheidsaspecten bij werken met lasers voor
materiaalbewerking

S 132

Nederlands Instituut voor Arbeidsomstandigheden



NIA0057355

Werken met industriële lasers

Een verkennende studie naar veiligheids- en gezondheidsaspecten bij werken met lasers voor materiaalbewerking

J.C.M. Mossink

Nederlands Instituut voor
Arbeidsomstandigheden NIA
bibliotheek-documentatie-informatie
De Boelelaan 32, Amsterdam-Buitenveldert

ISN-nr.
plaats
datum

7409
Ser. 4, S132
23 DEC. 1991

(2^e ex.)

Onderzoek uitgevoerd in opdracht van het
Directoraat-Generaal van de Arbeid door het
Nederlands Instituut voor Praeventieve
Gezondheidszorg/TNO

CIP-gegevens Koninklijke Bibliotheek, Den Haag

Mossink, J.C.M.

Werken met industriële lasers: een verkennende studie naar veiligheids- en gezondheidsaspecten bij werken met lasers voor materiaalbewerking / J.C.M.

Mossink - Den Haag: Arbeidsinspectie, Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid. - Ill. - ([Studie / Arbeidsinspectie], ISSN 0921-9218; S 132)

NIPG-publicatienr. 91014. - Met lit. opg.

ISBN 90 -5307-229-2

Trefw.: lasers; veiligheid.

INHOUD

pagina

SAMENVATTING	i
1. INLEIDING	1
2. OPZET EN UITVOERING VAN HET ONDERZOEK	3
2.1 Doel en probleemstelling	3
2.2 Methode en uitvoering	4
2.2.1 Literatuurstudie	4
2.2.2 Bedrijfsbezoeken en gesprekken	4
3. STAND VAN DE TECHNIEK	5
3.1 Technische achtergronden	5
3.1.1 Werking van de laser	5
3.1.2 Lasertypen voor materiaalbewerking	6
3.2 Toepassingsgebieden en omvang van de toepassing	9
3.3 Omvang van de toepassing van industriële lasers	12
3.4 Verwachte ontwikkelingen	12
4. VEILIGHEIDS- EN GEZONDHEIDSRISICO'S	14
4.1 Inleiding	14
4.2 Soorten van risico's	14
4.2.1 Stralingsrisico's, verbonden aan de laserbundel	14
4.2.2 Risico's van apparatuur	24
4.2.3 Risico's van toegepaste randapparatuur	26
4.2.4 Risico's van de bewerking	27
4.3 Uitwerking van de risico's bij verschillende bewerkingen	29
4.3.1 Operatieparameters bij bewerkingen	29

	pagina
4.3.2 Snijden	30
4.3.3 Boren	35
4.3.4 Lassen	37
4.3.5 Oppervlaktebehandelingen	39
4.4 Normering van stralingsrisico's	39
4.4.1 Overzicht	39
4.4.2 Achtergrond van normen	40
4.4.3 Gevarenklassen voor lasers	42
5. TAKEN, FUNCTIES EN BLOOTSTELLINGSRISICO'S	45
5.1 Voorbereidende taken	47
5.2 Ondersteunende taken	48
5.3 Organiserende taken	52
5.4 Uitvoerende taken	52
5.5 Ongevalsgegevens	54
6. PREVENTIEVE MAATREGELEN	56
6.1 Algemene strategie bij beperking van risico's	56
6.2 Maatregelen	57
6.2.1 Beperking van risico's bij de bron	57
6.2.2 Beperking van de overdracht, beschermende maatregelen	58
6.2.3 Beperking van de blootstellingsduur	63
6.2.4 Organisatorische maatregelen	63
6.2.5 Persoonlijke beschermingsmiddelen	64
7. AANBEVELINGEN VOOR FOLLOW-UP	66
7.1 Inleiding	66
7.2 Evaluatie risico's bij verschillende bewerkingen	66
7.3 Normen, onderbouwing en toepasbaarheid	67
7.4 Emissie van schadelijke stoffen	68
7.5 Ongevalsgegevens	68
7.6 EUREKA project "Safety in laser-technology"	69

	pagina
7.7 Voorlichting	70
8. CONCLUSIES	71
LITERATUUR	73
BIJLAGEN	75

SAMENVATTING

In opdracht van het Directoraat-Generaal van de Arbeid heeft NIPG-TNO een oriënterende studie verricht naar de veiligheids- en gezondheidsrisico's bij het werken met lasers. Het betreft hierbij alleen lasers met een hoog vermogen die worden ingezet voor materiaalbewerking in de industrie.

Het onderzoek is hoofdzakelijk verricht in de vorm van literatuurstudie. In aanvulling daarop is gesproken met gebruikers en deskundigen en zijn enkele bedrijfsbezoeken afgelegd.

Uit het onderzoek blijkt dat risico's van uiteenlopende aard voorkomen. De risico's kunnen betrekking hebben op:

- laserbundel (stralingsrisico's);
- laserapparatuur (elektrische (hoog)spanning, hete of koude gassen of vloeistoffen, vloeistoffen en gassen onder hoge of lage druk, straling en toxische stoffen);
- bewerking (straling, toxische stoffen, wegsplattend deeltjes, hete werkstukken);
- bewerkingsapparatuur (bijvoorbeeld mechanische gevaren).

Voor de maximale blootstelling aan laserstraling zijn normen opgesteld. Deze zijn in de praktijk echter moeilijk te hanteren. Een vereenvoudiging in de vorm van een klasse-indeling geeft snel inzicht in mogelijke stralingsrisico's, maar lijkt voor een nauwkeurige evaluatie van risico's te weinig houvast te bieden.

Veiligheids- en gezondheidsrisico's kunnen globaal worden ingeschat aan de hand van gegevens over de inrichting van bewerkingsystemen en de uitgevoerde bewerking. Blootstelling aan stralingsrisico's gerelateerd aan de laserbundel kan onder meer voorkomen in de volgende situaties:

- onderhoud en reparatie;
- uitlijnen en focuseren van de laserbundel;
- bewaken van bewerkingsprocessen;
- bij storingen in laserapparatuur en bundelgeleiding, met name bij laser-robots.

Bij sommige bewerkingen (snijden, boren) komen (deels toxische) stoffen vrij. Metingen bij werkstations geven aan dat in de meeste gevallen geen sprake zal zijn van overschrijding van de MAC-waarde. Het snijden van kunststoffen kan wel leiden tot een emissie van (mogelijk kankerverwekkende) stoffen, waaraan gezondheidsrisico's verbonden zijn. Het ontstaan van veiligheids- en gezondheidsrisico's bij verschillende bewerkingen is nog niet volledig doorgrond.

Er zijn verschillende mogelijkheden de risico's bij laserbewerkingen te beperken. De keuze van de bewerkingsparameters, het aanbrengen van beveiligingen en afschermingen, het plaatsen van een adequate afzuiging, organisatorische maatregelen en zonodig het gebruik van persoonlijke beschermingsmiddelen kunnen hieraan een bijdrage leveren.

Geconstateerd is dat in de kennis over het ontstaan van veiligheids- en gezondheidsrisico's bij materiaalbewerking met lasers lacunes bestaan. Een voorbeeld is de invloed van de bewerkingsparameters op de risico's. Dit gebrek aan kennis maakt dat de keuze van preventieve maatregelen wordt bemoeilijkt. Nader onderzoek op dit gebied wordt aanbevolen.

1. INLEIDING

Een laser is een stralingsbron die een bijzonder energierijke, geconcentreerde en nauwe bundel kan uitzenden. De laser, voor het eerst op laboratoriumschaal gebouwd in 1960, is in korte tijd ontwikkeld tot een volwaardig industrieel gereedschap. Er zijn tal van toepassingen gevonden. Deze liggen op gebied van communicatie, medische technieken, meten en materiaalbewerking. Het aantal toepassingen voor lasers groeit en het aantal geïnstalleerde lasers voor materiaalbewerking neemt jaarlijks toe. Ook de vermogens van de lasers worden groter. Voor de materiaalbewerking worden verschillende types lasers ingezet met een hoog energetisch vermogen. Deze lasers verschillen onderling voor wat betreft de toegepaste techniek, de wijze van gebruik, golflengte van de laserstraling en het geïnstalleerde vermogen. Toepassing van de laser komt voor in verschillende takken van industrie. Voorbeelden zijn plaatverwerkende industrie (snijden van plaatmateriaal), fijn mechanische industrie (puntlassen, naadlassen, boren) en in de elektronische industrie (vervaardiging van elektronische componenten, solderen van kleine onderdelen).

Aan het bewerken van materialen zijn risico's verbonden op gebied van veiligheid, gezondheid en in mindere mate welzijn. De veiligheidsrisico's houden verband met de laserbundel (stralingsrisico's), de toegepaste apparatuur en in sommige gevallen met de bewerking. Gezondheidsrisico's kunnen ontstaan bij blootstelling aan bepaalde soorten laserstraling en door de uitgevoerde bewerkingen. Welzijnsrisico's houden verband met de wijze waarop de apparatuur wordt gebruikt en onderhouden.

Dit rapport is de weerslag van een oriënterend onderzoek naar de wijze waarop lasers bij materiaal in de industrie worden gebruikt en welke risico's voor veiligheid, gezondheid en welzijn (VGW) hieraan zijn verbonden. Het accent ligt hierbij in hoge mate liggen op veiligheids- en gezondheidsrisico's.

Het onderzoek is door NIPG-TNO uitgevoerd in opdracht van het Directoraat ,
Generaal van de Arbeid in de periode september - november, 1990.

De opbouw van het rapport is als volgt:

- Hoofdstuk 2: Opzet en uitvoering van het onderzoek, doel, probleemstelling, geraadpleegde literatuur en bedrijfsbezoeken.
- Hoofdstuk 3: Stand van de techniek, lasertypen voor materiaalbewerking, toepassingsmogelijkheden en toekomstige ontwikkelingen.
- Hoofdstuk 4: Bespreking van veiligheids- en gezondheidsrisico's voor verschillende types lasers, apparatuur en bewerkingen;
- Hoofdstuk 5: Taken en functies bij gebruik van lasers voor materiaalbewerking in de praktijk; indicatie voor risicogroepen en enige ongevalsgegevens.
- Hoofdstuk 6: Overzicht van mogelijkheden om veiligheids- en gezondheidsrisico's te beperken.
- Hoofdstuk 7: Aanbevelingen voor follow-up.
- Hoofdstuk 8: Conclusies van het onderzoek.

2. OPZET EN UITVOERING VAN HET ONDERZOEK

2.1 Doel en probleemstelling

Het onderzoek beoogt een inventarisatie te geven van de te verwachten effecten op veiligheid en gezondheid bij gebruik van industriële lasers. Welzijnsrisico's zijn niet specifiek voor lasers, maar hangen samen met de inpassing van lasers in de produktietechniek en de organisatie. Voor een overzicht van welzijnsrisico's bij geavanceerde produktietechnieken wordt verwezen naar het CV-blad "Werken met CNC machines (DGA, 1991a) en het CV-blad "Werken met robots" (DGA, 1991b).

In het onderzoek is aandacht besteed aan:

- Inventarisatie van de stand van de techniek. Hierbij wordt ingegaan op de types van lasers en de mogelijkheden en beperkingen ervan bij toepassing in materiaalbewerking. Tevens komen de verwachte ontwikkelingen aan de orde.
- Een overzicht van risico-situaties bij industriële toepassing, gekoppeld aan ongevals (of bijna ongevals) gegevens.
- Het geven van een overzicht van indicaties voor richtlijnen om veiligheids- en gezondheidsrisico's te beperken.
- Het geven van indicaties voor normen op genoemd terrein.

De studie richt zich uitsluitend op types lasers met een hoog risico-potentieel zoals die worden gebruikt voor materiaalbewerking in de industrie.

2.2 Methode en uitvoering

Het onderzoek is voornamelijk verricht in de vorm van literatuurstudie. In aanvulling daarop zijn enkele bedrijfsbezoeken afgelegd en is gesproken met enkele gebruikers en deskundigen op het gebied van materiaalbewerking met lasers.

2.2.1 Literatuurstudie

Bij de literatuurstudie zijn bronnen op verschillende wijze ontsloten:

1. on-line search in verschillende bestanden op het gebied van 'occupational safety and health';
2. zoekacties in CD-ROM bestanden;
3. zoekacties in NIPG-bibliotheek; in bijlage 1 is een overzicht gegeven van de geraadpleegde tijdschriften.

2.2.2 Bedrijfsbezoeken en gesprekken

In aanvulling op de literatuurstudie zijn enkele bedrijfsbezoeken afgelegd en is gesproken met deskundigen en gebruikers. In de bedrijfsbezoeken is aandacht besteed aan de volgende onderwerpen:

- technische mogelijkheden, toepassing in de praktijk;
- werkplekinrichting;
- taken en functies;
- procedures, getroffen veiligheidsmaatregelen;
- ongevallen en/of incidenten.

Gegevens zijn ontleend aan gesprekken, observatie van de werksituatie en aan documentatie van fabrikanten van laserapparatuur.

3. STAND VAN DE TECHNIEK

3.1 Technische achtergronden

3.1.1 Werking van de laser

Een laser is een lichtversterker die berust op het verschijnsel van gestimuleerde emissie van straling (laser is een acroniem van Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). De lichtversterking wordt verkregen door energie toe te voeren aan een actief medium (zoals CO₂ of Nd³⁺ionen). Het actieve medium wordt hierdoor in een energierijke toestand gebracht. Het verschijnsel van de gestimuleerde emissie zorgt ervoor dat de terugval naar een toestand met lagere energie gecoördineerd verloopt. De straling die hierbij vrijkomt heeft dezelfde richting, golflengte en fase. Door de lichtbundel op te sluiten tussen twee spiegels ontstaat, zolang energie wordt toegevoerd, een lichtbundel met een steeds hogere intensiteit. Een deel van deze lichtbundel wordt afgetapt. Dit kan continu of in pulsen plaatsvinden. De toevoer van energie (pompen) kan geschieden door elektrische ontlading, lichtenergie of een chemische reactie. Slechts een klein deel van de toegevoerde energie komt in de vorm van laserstraling vrij (0,1% tot 15%, afhankelijk van het type), de rest wordt als warmte afgevoerd.

De laserbundel heeft een aantal specifieke eigenschappen:

1. monochromatisch, er is slechts één golflengte;
2. geringe divergentie, de bundel wordt slechts weinig breder;
3. hoge energiedichtheid.

Door deze eigenschappen is het mogelijk grote hoeveelheden energie over enige afstand over te brengen en te concentreren op een klein oppervlak (focuseren).

In de figuren 3.1 en 3.2 is een schematisch overzicht gegeven van de opbouw van enige belangrijke lasertypen.

3.1.2 Lasertypen voor materiaalbewerking.

Voor materiaalbewerking worden in de industrie lasers gebruikt met een hoog vermogen. De belangrijkste types zijn de CO₂-laser, de Nd:YAG en de Nd:Glas-laser. Daarnaast bieden ook de eximeer-laser, de robijn-laser, de argon-laser en de metaaldamp-laser mogelijkheden voor materiaalbewerking. In tabel 3.1 worden de eigenschappen van enkele lasers voor materiaalbewerking samengevat.

Tabel 3.1 Overzicht van eigenschappen van lasers voor materiaalbewerking (Bron: FME, 1988).

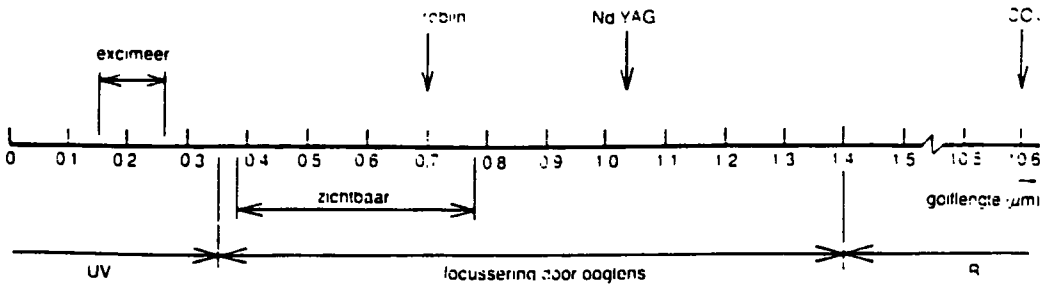
Type laser	werkingswijze	golflengte (nm)	vermogen of pulsenergie	pulsduur	pulsfrequentie		
CO ₂	continu	10600	tot 5 kW	cw	-		
	gepulst	10600	tot 5 kW			tot 20 kHz	
Nd:YAG	continu	1064	tot 600 W	cw	-		
	Q-switched	1064	1 mJ/puls			0,1 - 1 μs	tot 50 kHz
	gepulst	1064	tot 100 J/puls			0,1 - 20 ms	tot 300 Hz
Nd:Glas	gepulst	1064	tot 100 J/puls	1,5 - 10 ms	tot 10 Hz		
Robijn	gepulst	694	tot 10 J/puls	30 ns - 500 μs	tot 10 Hz		
Eximeer							
ArF	gepulst	193	200-500 mJ/puls	20 ns			
KrF	gepulst	248	300-1000 mJ/puls	20 ns			
XeCl	gepulst	308	100-600 mJ/puls	25 ns			
XeF	gepulst	351	100-400 mJ/puls	20 ns			

cw= continu werkend

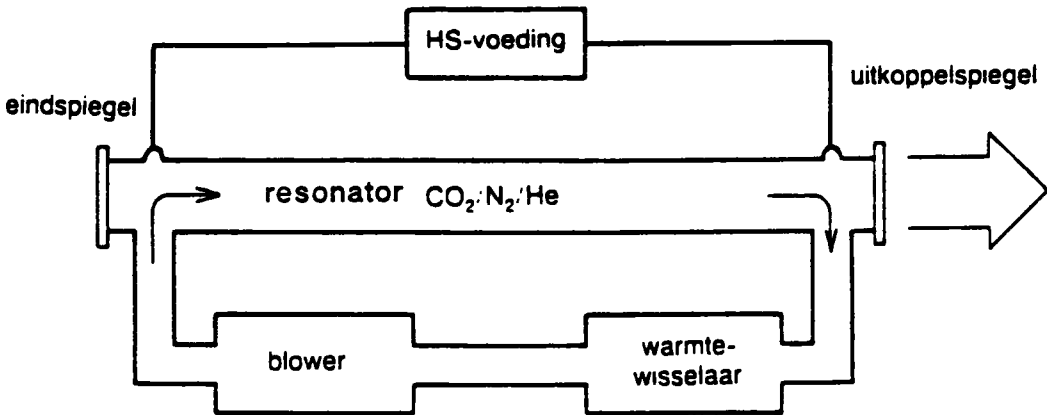
CO₂ laser

Het meest toegepast wordt de CO₂-laser. De CO₂-laser is een gaslaser, dat wil zeggen dat het actieve medium wordt gevormd door een gas. Commerciële systemen voor materiaalbewerking hebben een maximaal vermogen dat ligt tussen ca. 500 en 5000 W. De werking van dit type laser is schematisch afgebeeld in figuur 3.1.

Figuur 3.1 Elektromagnetisch spectrum met daarin de golflengte van verschillende typen lasers aangegeven



Figuur 3.2 Principe opbouw van een CO₂-laser

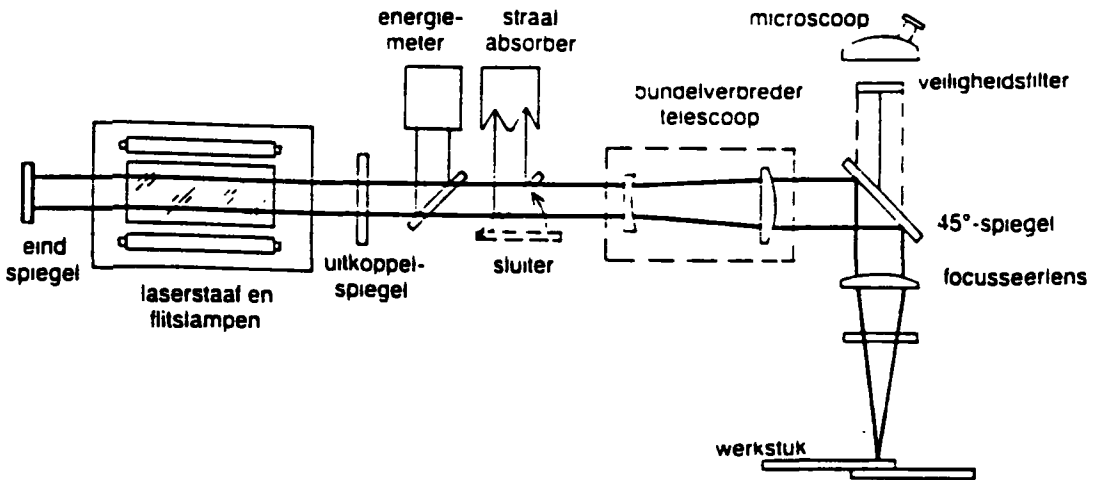


CO₂-lasers kunnen door koppeling worden opgeschaald, waardoor vermogens boven 20 kW bereikbaar zijn. CO₂-lasers kunnen continu of gepulst worden bedreven. De golflengte waarop de CO₂-laser werkt ligt in het ver infrarood (10600 nm).

Nd:YAG en Nd:Glas-laser.

Bij de Nd:YAG en Nd:Glas-laser is de actieve component (Neodymium ionen) aangebracht in een staaf (Yttrium-Aluminium granaat, 'YAG' of Glas). Er is dus sprake van een vaste stof-laser. Afhankelijk van de wijze waarop de laser bedreven wordt (continu, gepulst of 'Q-switched') zijn vermogens tot 600 W (Nd:YAG) of 20 W (Nd:Glas) mogelijk.

Figuur 3.3 Principe opbouw van een Nd:YAG-laser

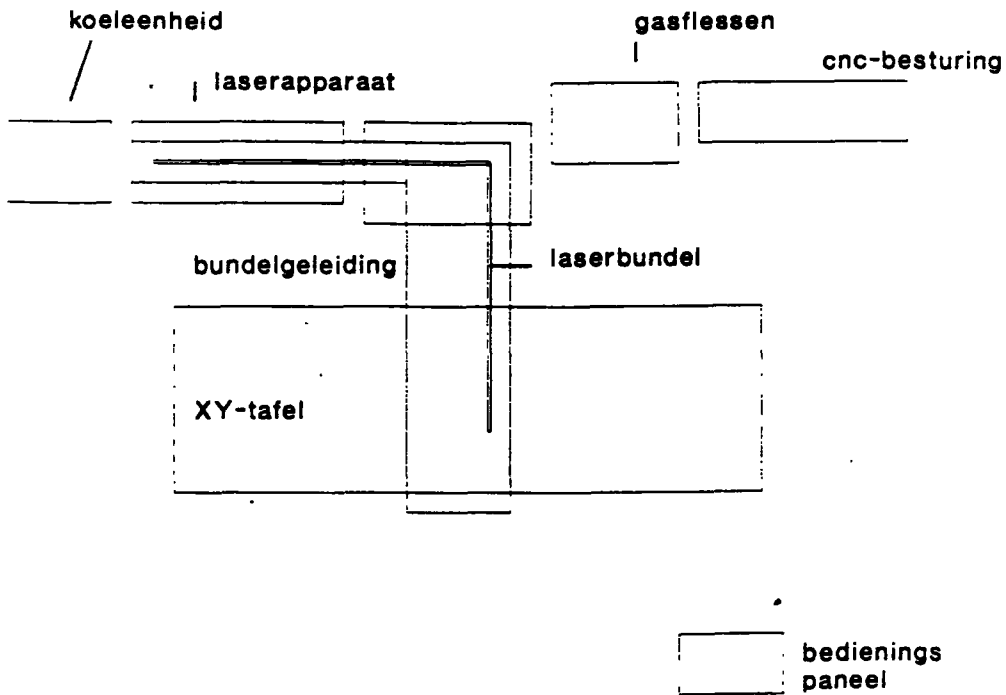


Opbouw van bewerkingsystemen

Een systeem voor materiaalbewerking met een CO₂-laser bestaat uit een aantal onderdelen, waaronder:

- laser (resonatorbuis, circulatiesysteem, koelsysteem, optiek);
- voeding (hoogspanningsdeel, RF unit (voor opwekken hoogfrequente wisselspanning));
- besturing (elektronische besturing);
- optiek (bundelgeleiding, focusseer-inrichting);
- gasvoorziening (aanvoer en reiniging van gassen voor laserwerking);
- bewerkingstafel en besturing, voorzieningen van aan- en afvoer materiaal en werkstukken.
- toevoer procesgas, afzuiging.

Figuur 3.4 Voorbeeld van een werkstation voor materiaalbewerking met CO₂-laser

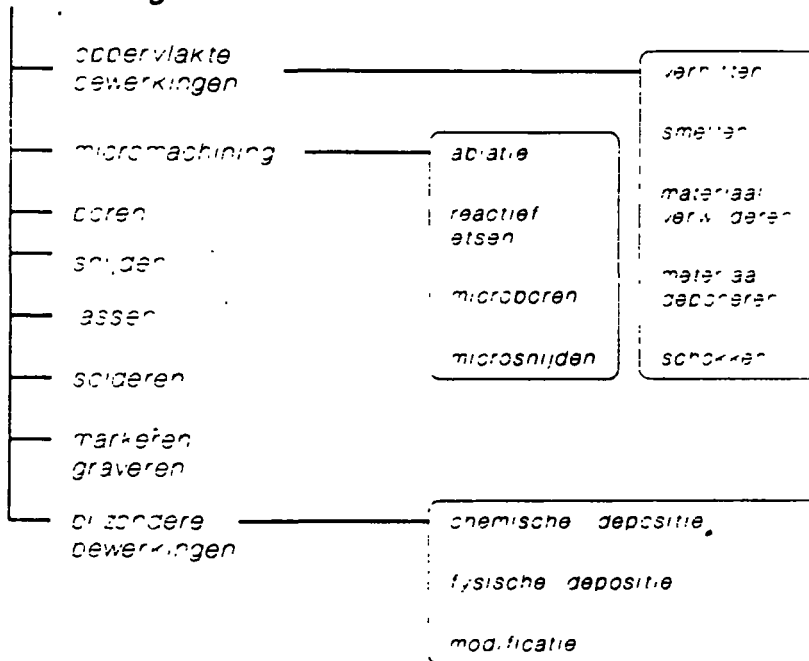


3.2 Toepassingsgebieden en omvang van de toepassing

Lasers kunnen ingezet worden voor zeer uiteenlopende materiaalbewerkingen. De belangrijkste hiervan zijn snijden, boren en lassen. Er zijn echter nog tal van andere toepassingen. In ontwikkeling zijn diverse vormen van oppervlaktebehandeling. In de literatuur worden verschillende overzichten van de mogelijkheden van materiaalbewerking met lasers gegeven (FME, 1988; Anon., 1989; Hardway, 1970; Wijers, 1989; Wijers, 1990; Koster, 1990). Van de meest voorkomende wordt hier een korte beschrijving gegeven.

Figuur 3.5 Overzicht van mogelijkheden voor materiaalbewerking met lasers. (Bron: FME, 1988)

Laserbewerkingen



Snijden

Lasersnijden is mogelijk voor zeer uiteenlopende materialen. De meeste metalen (uitgezonderd koper en edele metalen) kunnen met lasers gesneden worden. Staal is snijbaar tot een dikte van 10 mm, aluminium tot circa 4 mm. Ook kunststoffen, papier, textiel en leer lenen zich goed voor snijden met lasers. In de praktijk gebruikt men CO₂-lasers (continu) of Nd:YAG-lasers (gepulst). Voor snijden van keramiek worden ook wel robijn-lasers toegepast. Grote vermogens maken nauwkeurig werken bij hoge snijsnelheden mogelijk.

Boren

Bij boren wordt doorgaans gepulste CO₂ of Nd:YAG lasers gebruikt. CO₂-lasers worden vooral ingezet voor niet metallische materialen omdat deze straling met een golflengte van 10600 nm goed absorberen. De robijn-laser wordt ingezet bij broze en harde materialen (zoals keramiek en chips).

Lassen

Bij laserlassen kunnen zowel puntlassen als naadlassen worden verkregen. Het laserlassen wordt vooral toegepast als een hoge nauwkeurigheid wordt vereist. Bij fijnmechanische onderdelen en dunne folies gebruikt men vooral Nd:YAG-lasers. Voor het lassen van grotere plaatdelen en materiaaldikte zijn CO₂-lasers het meest geschikt. Er is een groot scala van lasconstructies mogelijk. Voorbeelden van industriële toepassing van het laserlassen zijn het laserlassen van titanium-gaasconstructies, precisieassen van kleppen en lassen van onderdelen van beeldbuizen.

Oppervlaktebehandeling

Lasers kunnen worden ingezet om materiaal plaatselijk te verhitten. Met dit principe zijn verschillende bewerkingen mogelijk, bijvoorbeeld:

- oppervlakte harden;
- oppervlakte legeren;
- textureren (aanbrengen van een structuur op een oppervlak);
- opdampen van materiaal.

Door de laser parameters goed te kiezen kan het gewenste effect worden bereikt. Bijvoorbeeld voor harden is een relatief laag vermogen en groot oppervlak vereist. Het aanbrengen van een textuur kan alleen door materiaal plaatselijk te verdampen.

Markeren. graveren

Markeren en graveren gebeurt veelal met gepulste CO₂ of Nd:YAG-lasers. Ook eximeer-lasers kunnen gebruikt worden. Markeren kan op uiteenlopende materialen (metalen kunststoffen, papier, hout, coatings). Toepassingen zijn onder meer het aanbrengen van houdbaarheidsdata op verpakkingen en het aanbrengen van teksten op elektronische componenten.

3.3 Omvang van de toepassing van industriële lasers

Momenteel is het aantal geïnstalleerde lasers nog betrekkelijk gering. In tabel 3.2 worden enige zeer globale schattingen gegeven.

Tabel 3.2 Schatting van het aantal in Nederland geplaatste lasersystemen voor materiaalbewerking (excl. Philips).

CO ₂ (>150 W)	ca. 75
Nd:YAG	ca. 15
Nd:Glas	ca. 15

Schattingen van het aantal geplaatste systemen (wereldwijd) lopen sterk uiteen. Een Amerikaanse schatting (Rockwell, 1984) geeft aan dat rond 1 miljoen mensen betrokken zijn bij de toepassing van industriële lasers, hetgeen inhoudt dat tussen 100.000 en 200.000 systemen geplaatst zijn. Ongeveer 90% van de betrokkenen zijn operator of servicemonteur. Een recenter schatting (Koster, 1990) is dat wereldwijd 17.000 lasers zijn geïnstalleerd.

De groei is rond 10% voor CO₂- en Nd:YAG-lasers en rond 25% voor eximeer-lasers. De verwachting is dat in Europa de groei van 10% tot 15% per jaar zal zijn (VDI, 1989).

3.4 Verwachte ontwikkelingen

Naast een groei van de markt voor systemen voor materiaalverwerkingen en lasers worden ook verbeteringen in de specificaties van de lasers verwacht.

Laserspecificaties

Verwacht wordt dat de vermogens van de lasers op de lange termijn aanmerkelijk zullen toenemen. Europees en Amerikaans onderzoek geeft aan dat 100 kW CO₂-lasersystemen, 20 kW Nd:YAG en 5kW eximeer-lasers tot de mogelijkheden zullen behoren. (VDI, 1989). In Europees verband wordt gewerkt aan een 25 kW CO₂-laser, een industriële CO-laser en hoogvermogen eximeer-lasers (EUREKA, 1990). Op korte termijn zullen Nd: YAG lasers to 2 kW beschikbaar komen.

Ook de operatiecondities zullen veranderingen ondergaan (verbetering levensduur, verhoging rendement, lopende kosten en dergelijke). Nieuwe typen van lasers voor materiaalbewerking worden niet verwacht.

CNC robots

Lasersystemen zullen in toenemende mate worden gekoppeld aan CNC-bewerkingssystemen en robots. Momenteel worden deze systemen al op de markt aangeboden. Het marktaandeel en de mogelijkheden van deze systemen zal in de toekomst groter worden (VDI, 1989; Rockwell, 1984; Schnauwers, 1990).

Een voorbeeld van een nieuwe ontwikkeling is een laserbewerkingseenheid waarin verschillende bewerkingen (frezen, lassen, textureren, harden) computergestuurd kunnen worden uitgevoerd.

Bewerkingen

De ontwikkeling van de toepassingsmogelijkheden bij materiaalbewerking gaat door. In de toekomst zullen nieuwe technieken van materiaalbewerking industrieel toepasbaar worden, bijvoorbeeld het modificeren van kunststoffen met eximeer-lasers.

4. VEILIGHEIDS- EN GEZONDHEIDSRISICO'S

4.1 Inleiding

Aan het werken met lasers zijn een aantal gevaren verbonden. Er zijn verschillende bronnen van risico's te onderkennen.

Het onderscheid tussen veiligheidsrisico's (acuut gevaar voor letsel) en gezondheidsrisico's (schade aan gezondheid op langere termijn) is vaak moeilijk te maken. Bijvoorbeeld stralingsrisico's kunnen een acuut karakter hebben (verbranding), maar ook effect op langere termijn hebben (mogelijk ontstaan van huidkanker door UV-straling). In dit hoofdstuk is ervoor gekozen een indeling te maken naar de bron van de risico's en per geval aan te geven of het veiligheid of gezondheidsrisico's betreft. Welzijnsrisico's vallen buiten het kader van dit onderzoek (zie hoofdstuk 2).

In dit hoofdstuk worden de volgende risico's onderscheiden:

1. stralingsrisico's, verbonden aan de laserbundel (paragraaf 4.2.1);
2. risico's verbonden aan de laserapparatuur (paragraaf 4.2.2);
3. risico's van andere bewerkingsapparatuur (paragraaf 4.2.3);
4. risico's, direct gerelateerd aan de uitgevoerde bewerking (paragraaf 4.2.4).

4.2 Soorten van risico's

4.2.1 Stralingsrisico's, verbonden aan de laserbundel

Gevolgen van blootstelling aan laserstraling

De eigenschappen van een laserbundel (hoge energie, geringe divergentie en de goede focusseerbaarheid) maken dat aan de laserbundel bijzondere gevaren zijn verbonden. CO₂-lasers en Nd:YAG-lasers zenden uit in het infrarood en robijnlasers in het zichtbaar deel van het spectrum. Het betreft hier niet-ioniserende

straling. Sommige eximeer-lasers (ArF, golflengte = 193 nm) zenden straling uit met voldoende energie-inhoud om ionisatie te veroorzaken.

Indien weefsel wordt getroffen door een laser-bundel kunnen verschillende effecten optreden (WHO, 1982; VDE 1987):

1. Thermische verwonding

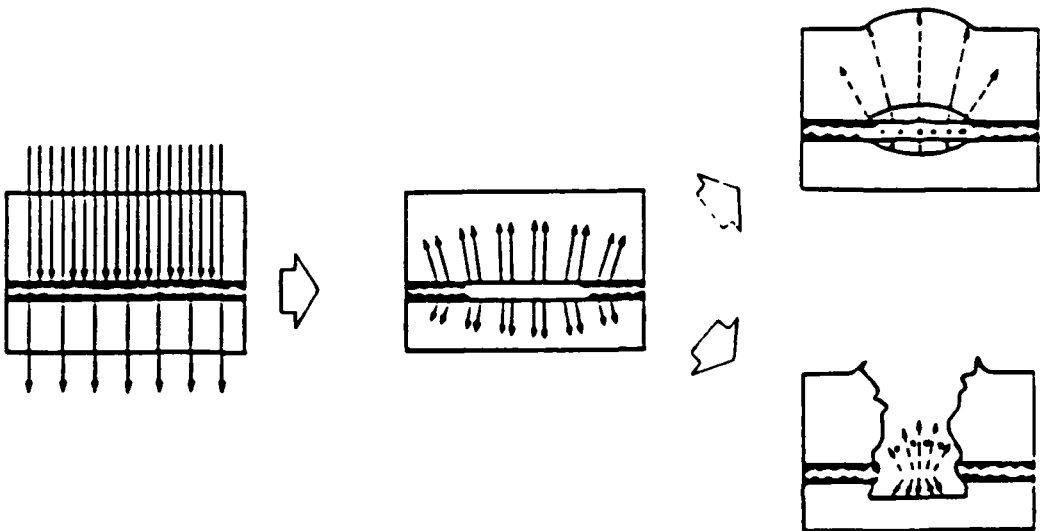
Als straling wordt geabsorbeerd loopt de temperatuur plaatselijk zeer sterk op. Hierdoor kunnen eiwitten afgebroken worden en er kan verbranding ontstaan. Bij kort durende (nano sec. bereik), intense straling kan weefselvocht plaatselijk gaan koken. De ontstane drukopbouw geeft vervolgens weefselbeschadiging (zogenaamd akoestisch effect, zie figuur 4.1).

2. Foto-chemische effecten

Straling met voldoende energie-inhoud (bijvoorbeeld UV-straling) kan foto-chemische reacties tot gevolg hebben, een voorbeeld is huidpigmentatie (bruining van de huid) en de vorming van vitamine D in de huid. Ook nadelige effecten zijn mogelijk, zoals een versnelde veroudering van de huid. Veel foto-chemische reacties worden nog onvoldoende begrepen.

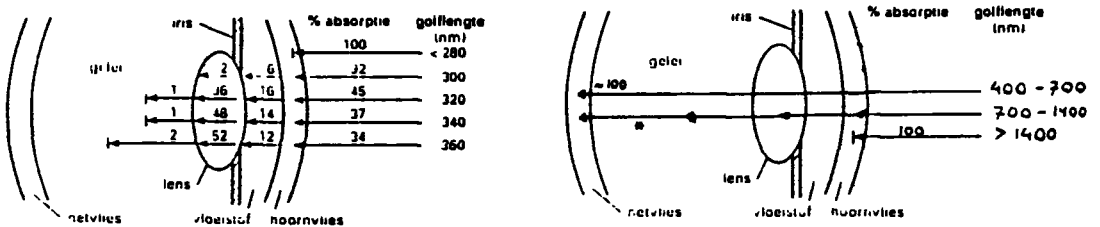
Foto-chemische effecten zijn vooral van belang bij grotere blootstellingsduur (meer dan ca. 100 s).

Figuur 4.1 Mechanisme van akoestische verwonding (Bron: VDE, 1987)

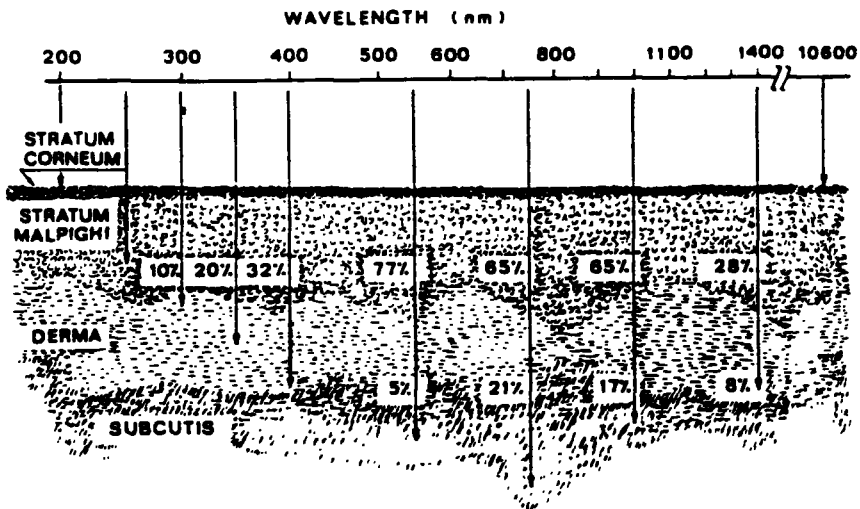


De indringdiepte van laserstraling is zeer gering, alle straling wordt in de buitenste lagen van de huid geabsorbeerd. Dientengevolge vormt laserstraling alleen een risico voor de huid en voor de ogen. Omdat het oog transparant is voor golflengten tussen 400 en 1400 nm kan ook het netvlies aan laserstraling worden blootgesteld (zie figuur 4.2). In tabel 4.1 is samengevat welke effecten blootstelling aan laserstraling kan hebben (Philips, 1985; VDE, 1987).

Figuur 4.2 Indringdiepte van niet-ioniserende straling in de ogen (Bron: Arbojaarboek, 1990)



Figuur 4.3 Indringdiepte van niet-ioniserende straling in de huid (Bron: WHO, 1982)



Tabel 4.1 Mogelijke effecten van blootstelling aan laserstraling. (Bron: Philips, 1985; VDE, 1987)

Lasertype	Golflengte (nm)	Oog	Huid
Excimeer	193 (ArF) 248 (KrF)	Hoornvlies- ontsteking	Eerstegraads verbranding, versnelde veroudering
Excimeer	308 (XeCl)	Hoornvlies- ontsteking	Verhoogde pigmentvorming
Excimeer	351 (XeF)	Fotochemische lenstroebeling	Donker worden van pigment Fotogevoelige reacties Verbranding
Robijn	694	Fotochemische en thermische netvliesschade	Fotogevoelige reacties Verbranding
Nd:YAG Nd:Glas	1064 1064	Lenstroebeling Netvliesver- branding	Verbranding
CO ₂	10600	Hoornvliesver- branding	Verbranding

In bepaalde condities is de huid kwetsbaarder voor straling dan de ogen. Bij de ogen is bescherming door de oogsluitreflex mogelijk. Alleen voor golflengten die door het oog gefocuseerd worden (400 - 1400 nm) is het oog gevoeliger.

In de praktijk geven Nd:Glas en Robijn-lasers door hun beperkte vermogen slechts brandwonden als de huid zich nabij het brandpunt bevindt. CO₂-lasers en Nd: YAG zijn in dit opzicht gevaarlijk. Door de diepe inbranding genezen de ontstane wondjes genezen slechts langzaam (Wijers, 1989), doch uiteindelijk is de genezing van verwondingen aan de huid vrijwel altijd volledig (WHO, 1982). Verbranding van grote delen van de huid kan ernstige gevolgen hebben, doch zal bij blootstelling aan laserstraling niet gemakkelijk voorkomen.

Netvliesbeschadiging kan leiden tot een blijvend functieverlies (vermindering van het gezichtsvermogen). De vermindering van het gezichtsvermogen is afhankelijk van de omvang van de netvliesbeschadiging en de plaats. Kleine beschadigingen buiten het centrale gezichtsveld worden vaak niet opgemerkt (Friedman, 1978; WHO, 1982). Soms kan bij kleine verwondingen een (gedeeltelijk) herstel van het gezichtsvermogen optreden.

Blootstelling van het hoornvlies aan UV straling kan leiden tot fotokeratitis (lasogen). Bekend is ook dat UV straling een vertroebeling van de ooglenzen kan geven.

Golflengten beneden 400 nm en boven 1400 nm kunnen hoornvliesverbranding veroorzaken. Beschadigingen aan het hoornvlies zijn pijnlijk, maar genezen doorgaans snel (WHO, 1982). Een neveneffect is dat het oog door de straling kan worden opgewarmd, hetgeen kan leiden tot vertroebeling van delen van het oog.

Op basis van schadelijke effecten voor ogen en huid zijn normen voor de maximaal toelaatbare blootstelling (MTB) afgeleid. Deze worden in paragraaf 4.4 besproken.

Risico's van de ongefocuseerde bundel

De geringe divergentie maakt dat een laserbundel zijn energie- of vermogensdichtheid (uitgedrukt in J/m^2 of W/m^2) over grote afstand behoudt. De afstand met nominaal risico (R_v) is gedefinieerd als die afstand waarop de laserstraling een vermogensdichtheid of energie heeft die lager is dan de maximaal toelaatbare blootstelling (MTB). Deze afstand kan worden berekend uit (Rockwell, Moss, 1989):

$$R_v = \frac{1}{\phi} \left[\sqrt{\frac{4 * P}{\pi * MTB}} - a \right] \quad (4.1)$$

Hierbij is: R_v = afstand tot laserbron waarbij de MTB waarde niet wordt overschreden

P = laservermogen of energie (W of J)

MTB = maximaal toelaatbare blootstelling (J/m^2 of W/m^2)

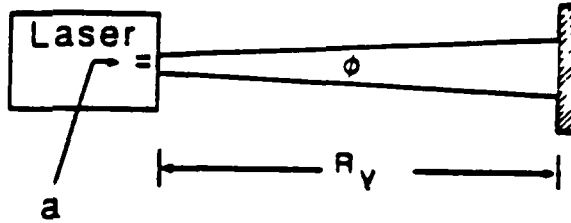
a = bundeldiameter (m)

ϕ = bundeldivergentie (rad)

De demping die optreedt door verstrooiing en absorptie in de lucht buiten beschouwing gelaten.

Figuur 4.4

Veilige afstand bij ongefocuseerde bundel (Bron, Rockwell, Moss, 1989).



Voor praktische toepassingen in materiaalbewerking geldt dat ongefocuseerde bundels tot op grote afstand gevaarlijk zijn (in de orde van vele honderden meters, tot enige kilometers, afhankelijk van het lasertype, zie tabel 4.2).

Gefocuseerde bundel

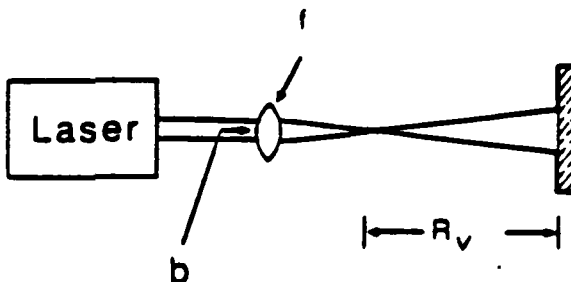
Vrijwel altijd wordt de laserbundel gefocuseerd. Voorbij het brandpunt verwijdt de bundel zich, doch een gevaarlijke blootstelling blijft tot ver voorbij het brandpunt mogelijk. Voor praktische gevallen is de veilige afstand in de orde van enige tientallen meters (afhankelijk van onder andere vermogen en lasertype). De afstand (R_v) kan worden afgeleid uit onderstaand verband. Tabel 4.3 geeft enige praktische waarden.

$$R_v = \frac{f}{b} \sqrt{\frac{4 * P}{\pi * MTB}} \quad (4.2)$$

- Hierbij is:
- R_v = veilige afstand tot laserbron (m)
 - P = laservermogen (W of J)
 - MTB = maximaal toelaatbare blootstelling (J/m^2 of W/m^2)
 - b = bundeldiameter (m)
 - f = brandpuntsafstand (m)

Figuur 4.5

Veilige afstand bij gefocuseerde bundel (Bron: Rockwell, Moss, 1989)



Tabel 4.2

Indicatie voor veilige afstand bij ongefocuseerde laserbundel voor verschillende lasertypen.

type laser	werkingswijze	vermogen of pulsenenergie	golflengte (nm)	pulsduur	MTB (ogen)	MTB (huid)	RV (ogen) (m)	RV (huid) (m)
Eximeer ARF	gepulst	250 mJ	193	20 ns	30 J/m ²	30 J/m ²	93	93
	Krf gepulst	500 mJ	248	20 ns	30 J/m ²	30 J/m ²	135	135
	XeCL gepulst	500 mJ	308	25 ns	40 J/m ²	40 J/m ²	30	30
	Xef gepulst	300 mJ	351	20 ns	67 J/m ²	67 J/m ²	14	14
Robijn	gepulst	5 J	694	500 µs	0,06 J/m ²	1600 J/m ²	10 km	52
Nd:YAG	continu	100 W	1064	-	16 W/m ²	2000 W/m ²	2810	242
	continu	600 W	1064	-	16 W/m ²	2000 W/m ²	7 km	608
	gepulst	20 J	1064	10 ms	2,8 J/m ²	3500 J/m ²	3 km	75
	Q-switched	1 mJ	1064	1 µs	0,05 J/m ²	3500 J/m ²	149	-
CO ₂	continu	500 W	10600	-	1000 W/m ²	1000 W/m ²	787	787
	continu	1250 W	10600	-	1000 W/m ²	1000 W/m ²	1250	1250
	continu	2500 W	10600	-	1000 W/m ²	1000 W/m ²	1774	1774

- 1) Er is gerekend met een golflengte van 200 nm.
- Divergentie: 1 mrad, bundeldiameter = 1 cm.
- 2) Blootstellingsduur: 1 werkdag.

Tabel 4.3

Indicatie voor veilige afstand bij gefocusseerde laserbundel voor verschillende lasertypen.

type laser	werkingswijze	vermogen of pulsenergie	golflengte (nm)	pulsduur	MTB (ogen)	MTB (huid)	Rv (ogen) (m)	Rv (huid) (m)
Eximeer ARF	gepulst	250 mJ	193	20 ns	30 J/m ²	30 J/m ²	0,77	0,77
	gepulst	500 mJ	248	20 ns	30 J/m ²	30 J/m ²	1,09	1,09
	gepulst	500 mJ	308	25 ns	40 J/m ²	40 J/m ²	0,30	0,30
	gepulst	300 mJ	351	20 ns	67 J/m ²	67 J/m ²	0,18	0,18
Robijn	gepulst	5 J	694	500 µs	0,06 J/m ²	1600 J/m ²	77	0,47
Nd:YAG	continu	100 W	1064	-	16 W/m ²	2000 W/m ²	21	1,89
	continu	600 W	1064	-	16 W/m ²	2000 W/m ²	51	4,64
	gepulst	20 J	1064	10 ms	2,8 J/m ²	3500 J/m ²	22,4	0,64
	Q-switched	1 mJ	1064	1 µs	0,05 J/m ²	3500 J/m ²	1,20	-
CO ₂	continu	500 W	10600	-	1000 W/m ²	1000 W/m ²	6,0	6,0
	continu	1250 W	10600	-	1000 W/m ²	1000 W/m ²	9,5	9,5
	continu	2500 W	10600	-	1000 W/m ²	1000 W/m ²	13,4	14,4

- 1) Er is gerekend met een golflengte van 200 nm.
 Bundeldiameter = 1 cm; brandpuntafstand = 7,5 cm.
 2) Betrokken op een hele werkdag.

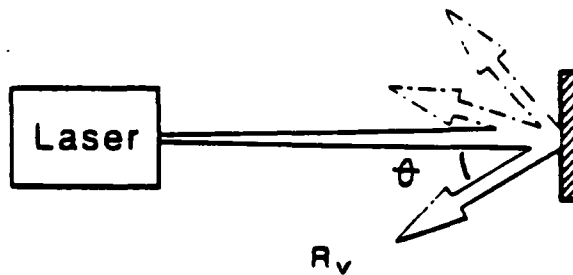
Diffuus reflecterende straling

Een laserbundel die een oppervlak treft zal gedeeltelijk worden gereflecteerd. In veel gevallen zal de reflectie diffuus van aard zijn: in alle richtingen wordt straling gereflecteerd. De veilige afstand (R_v) kan berekend worden uit:

$$R_v = \sqrt{\frac{\rho * P * \cos \theta}{\pi * MTB}} \quad (4.3)$$

Hierbij is: R_v = veilige afstand tot laserbron (m)
 P = laservermogen (W of J)
 MTB = maximaal toelaatbare blootstelling (J/m^2 of W/m^2)
 ρ = reflectiefactor
 θ = kijkhoek

Figuur 4.6 Veilige afstand bij diffuse reflecties (Bron, Rockwell, Moss, 1989)



Voor een praktische toepassing van de CO_2 -laser ligt de afstand R_v in de orde van enkele centimeters tot enige decimeters. Voor Nd:YAG of robijn-lasers kan de afstand vele meters bedragen (zie tabel 4.4).

Tabel 4.4

Veilige afstand bij diffuse reflecties voor verschillende lasertypen.

type laser	werkingswijze	vermogen of pulsenergie	golflengte (nm)	pulsduur	MTB (ogen)	MTB (huid)	Rv (ogen) (m)	Rv (huid) (m)
Eximeer	ARF	250 mJ	193	20 ns	30 J/m ²	30 J/m ²	0,03	0,03
	KrF	500 mJ	248	20 ns	30 J/m ²	30 J/m ²	0,05	0,05
	XeCl	500 mJ	308	25 ns	40 J/m ²	40 J/m ²	0,01	0,01
	XeF	300 mJ	351	20 ns	67 J/m ²	67 J/m ²	0,01	0,01
Robijn	gepulst	5 J	694	500 µs	0,06 J/m ²	1600 J/m ²	3,45	0,02
Nd:YAG	continu	100 W	1064	-	16 W/m ²	2000 W/m ²	2,32	0,21
	continu	600 W	1064	-	16 W/m ²	2000 W/m ²	1,0	0,03
	gepulst	20 J	1064	10 ms	2,8 J/m ²	3500 J/m ²	0,05	-
	Q-switched	1 mJ	1064	1 µs	0,05 J/m ²	3500 J/m ²	0,27	0,27
CO ₂	continu	500 W	10600	-	1000 W/m ²	1000 W/m ²	0,42	0,42
	continu	1250 W	10600	-	1000 W/m ²	1000 W/m ²	0,60	0,60
	continu	2500 W	10600	-	1000 W/m ²	1000 W/m ²	0,60	0,60

1) Er is gerekend met een golflengte van 200 nm.

Reflectiefactor = 0,9; kijkhoek = 60°.

2) Betrokken op een hele werkdag.

Niet geheel diffuus reflecterende straling

Reflecties hoeven niet volledig diffuus te verlopen. Het is mogelijk dat in een bepaalde richting meer straling wordt teruggekaatst of zelfs een spiegelende reflectie optreedt. Indien sprake is van spiegelende reflecties dan kan de veilige afstand berekend worden volgens de methode bij ongefocuseerde bundels.

Fibergeleiding

Straling van sommige lasertypen (bijvoorbeeld Nd:YAG en robijnlasers) kan door middel van glasfibers worden getransporteerd. Een bijzonder risico ontstaat bij breuk van een fiber. De laserbundel kan dan op een onverwachte plaats en in willekeurige richting uittreden. Breuk in fibers treedt vooral op bij mechanische belasting, bijvoorbeeld door bewegen. Bij uittreden uit een fiber gedraagt de bundel zich als een gefocuseerde of ongefocuseerde bundel. De richting wordt (mede) bepaald door de geometrie van het uittreevlak en de opbouw van de fiber.

4.2.2 Risico's van apparatuur

De apparatuur voor het opwekken van laserbundels is complex. Bij het werken ermee komen dan ook verschillende apparatuurgebonden risico's van uiteenlopende aard voor. Er is een onderverdeling gemaakt in:

- elektrische spanning;
- hete en koude vloeistoffen;
- vloeistoffen en gassen onder hoge of lage druk;
- begeleidende straling;
- toxische stoffen;
- brand- en explosiegevaar.

Bij normale bedrijfsvoering zijn doorgaans voldoende maatregelen getroffen die deze risico's beperken. Bij de bespreking van de risico's wordt waar nodig verwezen naar publicaties van de arbeidsinspectie (V- en P-bladen).

Elektrische spanning

Voor het opwekken van de laserwerking bij CO₂- Nd:YAG- ,Nd:Glas en eximeer-lasers wordt gebruik gemaakt van hoge spanningen (5-25 kV) (VDE, 1989; Chang, 1986). Aan het werken met hoogspanning zijn grote risico's verbonden. Aanraking van hoogspanning kan verbrandingen, shock of de dood tot gevolg hebben. Onderdelen die een hoge spanning voeren zijn bijvoorbeeld de hoogspanningsopwekkingseenheid, elektroden van de resonatorbuis, elektroden van flietsbuizen en condensatorbanken. De condensatoren die bij gepulste lasers voor flietsbuizen of lasers met hoogfrequente wisselspanning worden gebruikt zijn bijzonder gevaarlijk. Deze kunnen gedurende lange tijd na uitschakelen van de voedingspanning hun lading behouden, waardoor het gevaar van een elektrische schok blijft bestaan.

Elektrische spanningen tot 380 V komen voor bij de besturing en bij onderdelen van de laserapparatuur als pompen en koelaggregaat.

Hete en koude vloeistoffen en gassen

De gassen die in gas-lasers (CO₂, eximeer) worden toegepast kunnen een hoge temperatuur bereiken en worden gekoeld. Blootstelling aan hete gassen kan verbranding veroorzaken. Ook koelwater kan een hoge temperatuur hebben. Sommige types lasers worden gekoeld met vloeibare stikstof (Chang, 1989). Het werken met vloeibaar stikstof houdt risico van verbrandingsverschijnselen en bevroering in.

Vloeistoffen en gassen onder hoge en lage druk

Afhankelijk van het type laser komt een hoge (tot ca. 3 atm bij sommige types CO₂-lasers) en lage druk (tot ca. 0,01 atm, bij eximeer-lasers) voor. Voor de gasvoorziening van de resonatorbuis worden gasflessen onder hoge druk toegepast. Hoge druk komt ook voor bij de opslag van gassen in gasflessen.

Begeleidende straling

Opwekking van laserbundels kan gepaard gaan met begeleidende straling die veiligheids- en gezondheidsrisico's inhoudt (VDE, 1987; Chang, 1986).

- Röntgenstraling:** Het toepassen van hoogspanning (> 15 kV) kan het ontstaan van Röntgenstraling (Rö) tot gevolg hebben. Aan blootstelling aan Rö-straling zijn gezondheidsrisico's verbonden.
- Flitsbuizen:** Flitsbuizen voor het optisch pompen van Nd:YAG-lasers kunnen UV-, IR- en zichtbare straling van een gevaarlijk niveau uitzenden (VDE, 1987).
- Resonator:** Elektrische ontladingen in resonator buizen kunnen gepaard gaan met uitzenden van (o.a. zichtbare) straling. Het is niet duidelijk of deze straling gezondheidsrisico's inhoudt.

Toxische stoffen

Toxische stoffen komen voor bij enkele lasertypen. Bij CO₂-lasers, Nd:YAG en Nd:Glas-lasers, welke momenteel industrieel toegepast worden komen voor zover bekend geen toxische stoffen voor.

Bij eximeer-lasers wordt fluor of chloor gebruikt. Beide gassen zijn in hoge mate toxisch (Arbeidsinspectie 1982, Arbeidsinspectie, 1984), en aan opslag en transport worden speciale eisen gesteld. Eximeer-lasers worden in Nederland op beperkte schaal in de industrie toegepast. Ook bij de (experimentele) CO-laser wordt met toxische stoffen (CO) gewerkt. CO lasers worden vooralsnog niet in de industrie gebruikt.

Brand- en explosiegevaar

Voor zowel flitsbuizen als van condensatoren is bekend dat deze kunnen exploderen (Chang, 1989).

Het werken met fluor en chloor (bij eximeer-lasers) brengt door de hoge reactiviteit enige specifieke gevaren met zich mee.

4.2.3 Risico's van toegepaste randapparatuur

De toegepaste randapparatuur bij materiaalbewerking kan risico's inhouden voor veiligheid, gezondheid.

Gebruik van NC-apparatuur

Lasers worden veelal toegepast in combinatie met numeriek bestuurd apparatuur om de laserbundel over het te bewerken materiaal te sturen. Bewegende onderdelen van deze apparatuur kunnen een hoge snelheid bereiken. Het gevaar bestaat geraakt te worden door een bewegend onderdeel.

Bundelgeleiding

Fouten in de bundelgeleiding (foutieve uitlijning van spiegels, breuk van spiegels of lenzen, breuk in fibergeleiding) kan tot gevolg hebben dat de laserbundel uittreedt. Blootstelling aan de ongefocuste bundel is dan mogelijk. Vooral bij onderhouds- en reparatiewerkzaamheden kan dit voorkomen.

Robots

Bij het werken met robots komen veiligheidsrisico's van uiteenlopende aard voor. Eén van de gevaren is dat men geraakt wordt door een onverwachte beweging. Een uitgebreide bespreking van veiligheid bij robots wordt gegeven door Bonney (1985). Ook in het voorlichtingsblad 'Werken met Robots' (arbeidsinspectie, 1991b).

De combinatie van robot en lasers geeft een aantal specifieke risico's (Rockwell, 1984). Met name het gevaar voor onverwachte reflecties en het gevaar van de (gefocuste) bundel bij storing in de robot zijn belangrijk. Het is niet of nauwelijks mogelijk de bundel geheel op te sluiten anders dan door plaatsing in een aparte ruimte (zie ook hoofdstuk 6). Indien de laserbundel geen werkstuk raakt, zal een gefocuste bundel uittreden; elke richting is in principe mogelijk. De veilige afstand kan enige tientallen meters bedragen, zodat omstanders aan gevaarlijke stralingsintensiteiten blootgesteld kunnen worden (zie paragraaf 4.2.1).

4.2.4 Risico's van de bewerking

De uitgevoerde bewerking kan het ontstaan van nieuwe veiligheids- en gezondheidsrisico's tot gevolg hebben. In deze paragraaf wordt een kort overzicht gege-

ven. Voor de meest voorkomende bewerkingen worden de risico's in paragraaf 4.3 in grotere mate van detail uitgewerkt.

Straling

Bij de interactie van een laserbundel met een materiaal kunnen reflecties optreden en er kan straling worden uitgezonden. Indien zeer hoge temperaturen voorkomen dan zal de zogenaamde 'black-body' straling een grote intensiteit hebben, met daarin relatief veel UV-straling en blauw licht. Intensiteiten die een gevaar voor de gezondheid inhouden zijn hierbij mogelijk.

Bij lassen met lasers ontstaat een 'pluimstraling', met veel straling in het blauwe deel van het spectrum. Intensiteiten van schadelijk niveau zijn hierbij gemeten (Rockwell, 1983; Rockwell, 1989), zie ook paragraaf 4.3.4.

Eximeer-lasers kunnen ionisatie van de lucht veroorzaken. Hierbij kunnen zich lichtverschijnselen voordoen. Het is niet bekend in hoeverre hierbij schadelijke of gevaarlijke stralingsniveaus voorkomen.

Toxische stoffen

Bij snijden, boren en sommige oppervlaktebehandelingen van metalen en kunststoffen komt emissie van aërosolen en gassen voor (Haferkamp et al, 1990). In paragraaf 4.3 wordt hierop uitgebreid ingegaan. Eximeer-lasers (met name ArF, golflengte is 193 nm) kunnen door hun vermogen lucht te ioniseren ozon (O₃) vorming tot gevolg hebben. Ozon is een toxisch en reactief gas. Bij reactie van ozon met bijvoorbeeld kunststoffen kunnen toxische reactieproducten ontstaan.

Wegspattende deeltjes

Bij snijden van metalen wordt slak gevormd. Doorgaans worden de slakdeeltje weggeblazen door een snijgas, niettemin is het mogelijk dat deeltjes wegspatten. Ook bij boren kunnen wegspattende deeltjes voorkomen.

Hete werkstukken

Door lasers bewerkte materialen zijn plaatselijk heet. Vaak is niet goed zichtbaar of een werkstuk in voldoende mate is afgekoeld. Doordat de verhitte zone doorgaans klein van afmeting is zal een werkstuk snel afkoelen.

Brand- en explosiegevaar

Interactie van een laserbundel met brandbare materialen (hout, papier, kunststoffen) kan ontbranding van het materiaal tot gevolg hebben. In sommige gevallen is explosie mogelijk (Chang, 1989).

4.3 Uitwerking van de risico's bij verschillende bewerkingen

4.3.1 Operatieparameters bij bewerkingen

De operatieparameters van de laserapparatuur en de condities waaronder een bewerking wordt uitgevoerd zijn van invloed op de veiligheids- en gezondheidsrisico's. Onder de operatieparameters worden in dit geval verstaan:

- eigenschappen van de laserbundel (vermogen, bundeldiameter, bundeldivergentie, spatiele vermogensverdeling, temporele vermogensverdeling, golflengte, pulsduur, pulsrequentie, brandpuntsafstand van de lens);
- eigenschappen van het te bewerken materiaal (zoals chemische samenstelling, smeltpunt, warmtegeleidingscoëfficiënt, en reflectiefactor);
- bewerkingsparameters (verzameling van bewerkingsafhankelijke grootheden zoals snijsnelheid en lasgeometrie);
- inrichting bewerkingscentrum (afmetingen, opbouw, lay-out);
- afmetingen en geometrie van het werkstuk.

Voor een groot deel worden de effecten van deze parameters op veiligheid en gezondheid niet in de literatuur beschreven.

In de volgende paragrafen wordt voor enkele bewerkingen (snijden, boren, lassen en oppervlakte behandeling) een afschatting van de risico's gemaakt, voor zover dat op basis van gegevens uit literatuur, bedrijfsbezoeken en gesprekken mogelijk is. De afschatting is globaal. Binnen het kader van dit onderzoek is een gedetailleerde risico-evaluatie niet mogelijk. Ook het afschatten van risico's van weinig toegepaste of experimentele bewerkingen valt buiten het kader van dit onderzoek.

4.3.2 Snijden

Bij snijden met een laserbundel wordt materiaal plaatselijk tot boven het smeltpunt verhit. De operatiecondities worden zodanig gekozen dat het materiaal grotendeels verdampt. Gebruik van een (actief of inert) snijgas kan het proces versnellen.

Er doen zich de volgende bewerkings specifieke risico's voor:

- stralingsrisico's;
- emissie van toxische stoffen;
- apparatuurgebonden risico's.

Stralingsrisico's

Er doen zich bij snijden van vlakke materialen enkele situaties voor waarbij een gevaarlijke of schadelijke blootstelling kan ontstaan:

1. de laser is ingeschakeld terwijl de bundel geen materiaal treft;
2. diffuse of niet geheel diffuse reflecties;
3. pluim-straling of black-body straling.

Ad 1 Bij sommige toepassingen wordt het snijden gestart vanuit een reeds bestaand gat. De laserbundel wordt dan ingeschakeld terwijl zich geen materiaal in de bundel bevindt. Blootstelling aan de (gefocusseerde) bundel is mogelijk als de bundel niet wordt opgevangen en gereflecteerd wordt (bijvoorbeeld op metaaldeeltjes in de omgeving). De veilige afstand voor reflecties is voor deze situatie af te leiden uit vergelijking (4.3), paragraaf 4.2.1. Ook bij fouten in de (C)NC programmatuur kan het voorkomen dat de laserbundel geen materiaal treft.

Ad 2 Reflecties kunnen voorkomen als de laserstraling niet voldoende door het materiaal wordt geabsorbeerd. Met name zilver, koper, messing, en in zekere mate ook goud hebben een hoge reflectiefactor. Een deel van de straling wordt (afhankelijk van de oppervlaktestructuur) spiegelend teruggekaatst. Hierdoor kunnen ook beschadigingen aan de laserapparatuur ontstaan. Snijden van deze materialen (en legeringen hiervan) is

niet goed mogelijk. Diffuse reflecties bij Nd:YAG-lasers zijn relatief gevaarlijk; de veilige afstand is in de order van een aantal meters (zie tabel 4.4). Daar tegenover staat dat de meeste metalen deze golflengte beter absorberen. Bekend is dat tijdens het inkoppelen kortdurend een hoge reflectie voorkomt (Rockwell, 1989).

Ad 3 Bij lasersnijden vormt zich geen pluim en er is niet of nauwelijks sprake van black-body straling. Het maximumniveau is laag en ligt tussen 1 en 2 cd/m² bij toepassing van een 3650 W CO₂-laser (Rockwell, Moss, 1989).

Bij lasersnijden met robots is het moeilijk het gevaar van reflecties (diffuus en van gefocuseerde bundel) en het gevaar van de ongefocuseerde bundel te beheersen. Dit wordt door een aantal factoren veroorzaakt:

- de bundel kan een willekeurige oriëntatie in de ruimte hebben;
- gereflecteerde bundels kunnen een willekeurige oriëntatie hebben (mede veroorzaakt door de geometrie van het werkstuk); men zal trachten de bundel steeds loodrecht op het werkstuk te laten invallen, doch er zijn situaties denkbaar waarin dit niet mogelijk is; er kunnen (bijvoorbeeld door onnauwkeurige maatvoering) gemakkelijk fouten ontstaan;
- het is niet goed mogelijk de bundel met een bundelvanger te absorberen;
- de kans op storingen wordt door de robot vergroot;
- programmatuur is complex waardoor sneller fouten kunnen ontstaan.

Toxische stoffen

Het snijden van metaal en kunststof leidt tot emissie van deels toxische stoffen. Deze komen vrij in de vorm van gassen, dampen of aerosolen. De emissie van toxische stoffen wordt momenteel op verschillende plaatsen onderzocht (EUREKA, 1990).

Onderzoek van Haferkamp et al. (1990) naar de emissie van toxische stoffen bij het snijden van verschillende metalen geeft aan dat, afhankelijk van metaalsoort

en dikte, tussen 0,1 en 2 gram materiaal per gesneden meter vrijkomt in de vorm van aerosolen. Een van de bevindingen van het onderzoek is dat de geëmitteerde hoeveelheid minimaal is bij optimale snijparameters (laservermogen en snijsnelheid). In tabel 4.5 is een overzicht gegeven.

Tabel 4.5 Overzicht van emissie van dampen en aerosolen bij het snijden van verschillende staalsoorten onder optimale snijcondities (Bron: Haferkamp, 1990)

materiaal	dikte (mm)	snijsnelheid (m/s)	emissie (mg/m)	belangrijkste componenten
St 37	1	4000	135	Fe (64%)
	3	2500	272	Fe (64%)
X5CrNi189	1	3000	422	Fe (41%), Cr (8%), Ni (8%)
X5CrNi189	3	2300	1122	Fe (41%), Cr (8%), Ni (8%)
St 37-03 (verzinkt)	1	-	243	Fe (53%), Zn (16%)

Het snijden van CrNi-staalsoorten verdient bijzonder aandacht door de relatief grote fractie Cr^{VI} in de aerosolen. Ook werd vrij veel Ni aangetroffen. Van Cr^{IV} en Ni is bekend dat deze een hoge mate van toxiciteit bezitten. Bach (1988) wijst op het gevaar van snijden van hooggelegerde staalsoorten. Hierbij kan blootstelling ontstaan aan uiteenlopende metalen (en metaal oxyden) zoals mangaan(oxyde).

Metingen bij een aantal werkplekken (Haferkamp et al, 1990) laten zien dat de stofconcentraties over het algemeen ruim beneden de MAC-waarden blijven (zie tabel 4.6). Alleen in geval van het snijden van CrNi staal is de Cr^{IV}-concentratie hoger dan de MAC-waarde. Opgemerkt moet worden dat het verspreidingsgedrag van toxische stoffen in een ruimte van zeer groot belang is op de gemeten concentraties.

Tabel 4.6 Stofconcentraties bij werkplekken voor lasersnijden (Bron: Haferkamp et al, 1990)

werkplek	materiaal	concentratie bij werkplek (mg/m ³)	concentratie in omgeving (mg/m ³)
1	CrNi staal	1,3	0,5
2	St 37 (3 mm)	0,9	0,7
3	St 37 (3 mm)	1,5	1,2
4	Keramiek	1,4	1,2
5a	geolied blik	0,1	0,1
5b	geolied aluminium	0,1	0,1

Bijzondere situaties kunnen zich voordoen als het te snijden metaal is voorbehandeld (met olie, of coatings). De opgebrachte laag kan aanleiding geven tot het ontstaan van toxische stoffen (bijvoorbeeld loodemissie bij snijden van materiaal behandeld met loodmenie).

Het snijden van kunststoffen leidt doorgaans tot het ontstaan van uiterst complexe mengsels van deels gasvormige en deels aërosolvormige stoffen. Uit kwalitatief onderzoek (Doyle, 1985; Haferkamp et al, 1990) blijkt dat schadelijke stoffen vrijkomen bij alle onderzochte kunststoffen (zie tabel 4.7). Onder deze zijn stoffen die kankerverwekkende eigenschappen hebben. Onder pyrolitische omstandigheden (er vindt geen oxidatie plaats) zijn verschillende kunststoffen gesneden. Stoffen die bij vrijwel alle kunststoffen (bestaande uit polymeren) vrijkomen zijn de monomeren van het polymeer, korte polymeerketens, benzeen, toluen en polycyclische aromatische koolwaterstoffen.

Bij snijden van polyetheen komen voornamelijk alifatische en olefinische producten vrij. (C₇ tot C₁₉). Bij polypropeen snijden zijn meer dan 60 stoffen geïdentificeerd voornamelijk (vertakte) alkanen en alkyne, cyclische, alifatische en olefinische koolwaterstoffen. Snijden van polystyreen geeft voornamelijk styreen, daarnaast komen in lagere concentraties styreen en benzeen derivaten voor. Snijden van polycarbonaat geeft vergelijkbare producten, doch ook furanen en chloorbenzeen. Bij snijden van polymethyl methacrylaat (plexiglas) ontstaat een groot aantal (ook zuurstofhoudende) producten, waaronder verschillende benzeenderivaten. Het lasersnijden van PVC (Doyle, 1985) leidt tot het ontstaan

van onder meer waterstofchloridegas en vinylchloride. Daarnaast werden verschillende polycyclische aromaten aangetroffen.

Kokosa en Doyle (Haferkamp, 1990) onderzochten verschillende materialen, waaronder PVC en Kevlar (aramide vezel). Ook door hen wordt emissie van complexe mengsels van deels schadelijke stoffen gemeld. De verwachting is dat de zeer extreme condities waaronder lasersnijden plaatsvindt vrijwel altijd leiden tot de vorming van ingewikkelde mengsels van reactieproducten.

Tabel 4.7 Overzicht van emissie van gassen en aerosolen bij het snijden van verschillende soorten kunststoffen (Bron: Haferkamp, 1990; Doyle, 1985).

kunststof	vrijgekomen stoffen (Haferkamp, 1990)	vrijgekomen stoffen (Doyle, 1985)	MAC-waarde (ppm)	kankerverwekkend
PP, PE	heptaan	*	400	ja
	octaan		300	
	tolueen		100 H	
	benzeen		10 H	
	dodeceen		n.v.	
PS	benzeen		10 H	ja
	tolueen	*	100 H	
	ethylbenzeen		100	
	styreen		100	
	bifenyl		0,2	
	naftaleen		10	
PC	benzeen		10 H	ja
	tolueen	*	100 H	
	chloorbenzeen		75	
	ethylbenzeen		100	
	xyleen		100 H	
	styreen		100	
PMMA	benzeen	benzeen	10 H	ja
	tolueen	tolueen	100 H	
	xyleen		100 H	
	styreen		100	
	methylmethacrylaat cumeen	methylmethacrylaat	50 H	
PVC	*	waterstofchloride		ja
		benzeen	10 H	
		vinylchloride		
		tolueen	100 H	
		styreen	100	

H = opname via de huid
* = niet onderzocht

PE = polyethyleen
PP = polypropyleen
PS = polystyreen
PL = polycarbonaat
PMMA = polymethyl methacrylaat
PVC = polyvinyl chloride

Lasersnijden wordt ook wel toegepast bij het snijden van ondermeer natuurlijke materialen (leer, papier, hout). Hoewel de emissie van toxische stoffen hierbij de aandacht heeft (EUREKA, 1990) zijn geen gegevens bekend.

4.3.3 Boren

Boren met lasers vindt plaats door materiaal plaatselijk te verhitten boven het smelt- of kookpunt. Voor het boren zijn verschillende technieken ontwikkeld. Voor een uitvoerige beschrijving wordt verwezen naar 'Laserbewerkingen' (FME, 1988). Laserboren vindt voornamelijk toepassing bij bewerken van keramiek of bij het boren van zeer kleine gaten of precieze patronen in metaal. De risico's bij boren houden voornamelijk verband met stralingsrisico's, vrijgekomen materiaal en de apparatuur. In deze paragraaf wordt op de stralingsrisico's nader ingegaan.

Stralingsrisico's

Bij boren van kleine gaten in metaal maakt men vooral gebruik van gepulste Nd:YAG-lasers. Er wordt ook wel met CO₂-lasers (gepulst) gewerkt. Operatieparameters zijn een pulsenergie tussen 0,1 en 30 J, pulsduur van 0,1 tot 0,5 ms en een herhalingsfrequentie die ligt tussen 5 en 100 Hz (voor Nd:YAG-lasers).

Bij boren komt bij de eerste puls een hoge mate van reflectie voor (vooral bij koper, zilver, goud, blankgewalst nikkel en titaan). Bij volgende pulsen wordt de straling in steeds hogere mate geabsorbeerd. Voor de bepaling van waarden voor de maximaal toelaatbare blootstelling (MTB) betekent dit een complicatie, omdat bij de normering wordt uitgegaan van pulsen met gelijke intensiteit. Een schatting kan worden verkregen door de MTB-waarde te bepalen voor één of enkele pulsen. De maximaal toelaatbare blootstelling voor één puls is gegeven in tabel

4.8

Tabel 4.8 Maximaal toelaatbare blootstelling voor de ogen en afstand met nominaal risico (Rv) bij laserboren met Nd:YAG-laser, gebaseerd op één puls

pulsduur (ms)	pulsenergie (J)	Rv diffuse reflectie (m)	Rv gefocuseerde bundel (f= 7,5 cm) (m)	MTB ₂ (J/M ²)
0,1	0,1	0,53	8,9	0,09
	1	1,66	28	0,09
	3	2,9	49	0,09
	30	9,1	154	0,09
0,25	0,1	0,37	6,3	0,18
	1	1,18	20	0,18
	3	2,04	34	0,18
	30	6,5	109,5	0,18
0,5	0,1	0,29	4,9	0,3
	1	0,91	15	0,3
	3	1,6	27	0,3
	30	5	85	0,3

Operatiecondities: reflectiefactor = 0,9; kijkhoek = 0,52 (rad)
bundeldiameter = 1 cm; divergentie = 1 (mrad)

Het is mogelijk gaten te boren onder scherpe hoeken (tot onder een hoek van 15° met het werkstuk). Dit heeft tot gevolg dat reflecties in een veelheid van richtingen kunnen optreden. Iets soortgelijks doet zich ook voor bij boren in onregelmatig gevormde werkstukken. In de literatuur zijn geen gegevens over deze stralingsrisico's bekend.

Toxische stoffen

Het wegnemen van materiaal vindt plaats door verdamping en smelten. Soms wordt een (inert of actief) procesgas toegepast. Het vrijgekomen materiaal wordt weggeblazen. Bij het boren van kleine gaten, kleine series, zal betrekkelijk weinig materiaal vrijkomen, doch indien veel gaten worden geboord kan de hoeveelheid geëmitteerd materiaal aanzienlijk zijn.

In de literatuur zijn geen onderzoeken naar toxische stoffen bij boren beschreven. Aangenomen mag worden dat de emissie (kwalitatief gezien) vergelijkbaar is met de optredende emissie bij snijden (zie paragraaf 4.3.2).

4.3.4 Lassen

Laserlassen geschiedt door het metaaloppervlak plaatselijk tot boven het smeltpunt te verhitten. De te lassen delen worden hierdoor samen gesmolten. In de praktijk zijn tal van verschillende lasgeometrieën mogelijk (FME, 1988). Laserlassen vindt vooral toepassing bij lasprocessen waarbij grote nauwkeurigheid vereist is.

Het lasproces vereist dat zo weinig mogelijk materiaal verdampt. Er zullen derhalve niet of nauwelijks toxische stoffen vrijkomen. De belangrijkste risico's worden gevormd door de straling.

Stralingsrisico's bij laserlassen zijn uitvoerig onderzocht door Rockwell en Moss (1983, 1989). Er zijn twee bronnen van risicovolle straling te onderscheiden: gereflecteerde straling en pluimstraling.

Reflecties

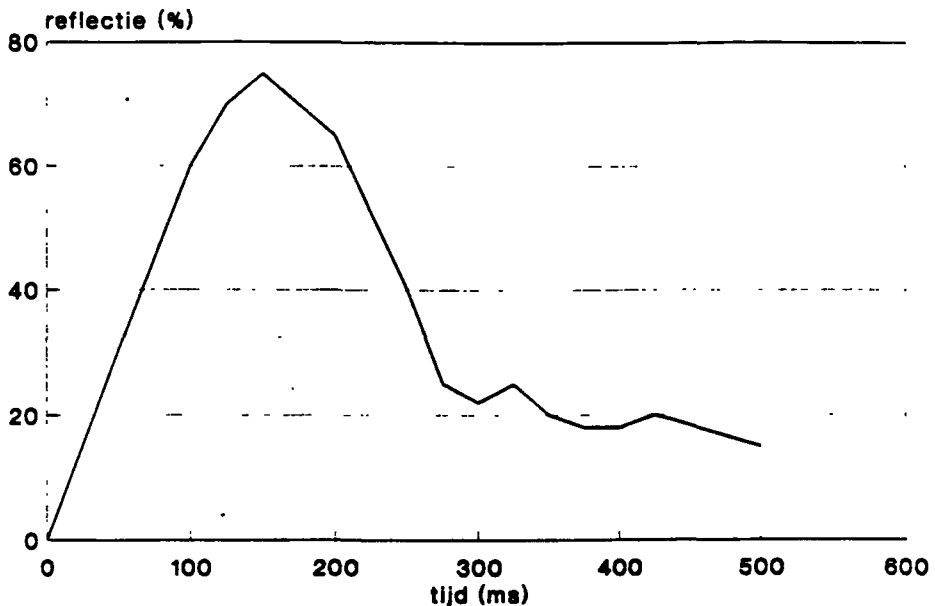
De intensiteit van de diffuus gereflecteerde straling bij gebruik van een Nd:Y-AG-laser is afhankelijk van de aard van het materiaal, de kijkhoek en de richting waarin gelast wordt. De gemeten intensiteit van de gereflecteerde straling komt redelijk overeen met de theoretische waarde bij diffuse reflectie (vergelijking (4.3), zie paragraaf 4.2.1). Opmerkelijk is dat de stralingsintensiteit in de lasrichting ca. 25% hoger is dan van de lasrichting af.

Uit berekeningen blijkt dat bij de condities waaronder gemeten is (300W Nd:Y-AG) de veilige afstand voor de huid ca. 6 cm. bedraagt en voor de ogen 3,8 m.

Bij lassen met een CO₂-laser (Rockwell, Moss, 1989) werd eveneens redelijke overeenkomst met de theoretische waarde voor diffuse reflectie gevonden.

Bij de evaluatie van stralingsrisico's bij laserlassen is met name het inkoppelgedrag (verloop van de mate van absorptie) van de bundel van belang. De reflectiefactor blijkt sterk afhankelijk van een groot aantal parameters, waaronder de temperatuur, en de optische eigenschappen van het materiaal (FME, 1988). De reflectiefactor is bij inkoppeling aanvankelijk hoog (tot boven 80%) en neemt dan af tot ca 20% (zie figuur 4.7).

Figuur 4.7 Reflectie als functie van de tijd bij een gepulste CO₂-laser



Gezien het feit dat reeds bij een zeer korte blootstellingsduur letsel mogelijk is, is het van groot belang het inkoppelgedrag van de laserbundel bij de evaluatie van stralingsrisico's mee te wegen. De geometrie van de lasnaad lijkt mede bepalend voor de richting van de reflecties. Er is echter geen onderzoek naar de invloed van de lasgeometrie bekend.

Pluimstraling

Bij laserlassen vormt zich boven het gesmolten metaal een plasma waarin vrijwel alle laserstraling wordt geabsorbeerd. Het plasma zendt straling van hoge intensiteit uit in de vorm van UV-straling en blauw licht (golflengte tussen 250 en 450 nm). Er kan hierbij gemakkelijk blootstelling boven de maximaal toelaatbare waarde ontstaan. Bij lassen met een Nd: YAG-laser werd een waarde gemeten van $60\mu\text{W}/\text{cm}^2$, (Maximaal Toelaatbare Blootstelling = $1\mu\text{W}/\text{cm}^2$) (Rockwell, Moss, 1983) en bij lassen met CO₂-lasers een waarde van $3\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (Rockwell, Moss, 1989).

4.3.5 Oppervlaktebehandelingen

Kenmerk van oppervlaktebehandelingen met lasers is dat plaatselijk verhitting optreedt, bij harden tot onder het smeltpunt, bij oppervlakte legeren tot boven het smeltpunt. Er komen bij harden en legeren in principe geen (toxische) stoffen vrij. Bij textureren wordt wel materiaal verwijderd en ontstaat emissie van mogelijk toxische stoffen. De risico's bij harden en legeren worden in hoofdzaak gevormd door stralingsrisico's. De bespreking van de risico's is summier, een uitgebreide behandeling is binnen het kader van dit onderzoek niet mogelijk.

Stralingsrisico's

Bij een aantal oppervlaktebewerkingen kan het nodig zijn het materiaal te verhitten met een brede bundel. De gereflecteerde straling mag dan niet meer als een puntbron worden opgevat. Voor blootstelling aan straling aan uitgestrekte bronnen zijn aparte normen afgeleid (VDI, 1987).

Bij laserharden is de reflectie doorgaans zeer hoog (80% - 90%). In de praktijk worden coatings toegepast om de reflectie verminderen. De reflectie kan hierdoor afnemen tot 10%-20%. Bij harden is de vermogensdichtheid ca 10^4 W/cm² en de interactietijd 10 - 100 ms op één punt van het materiaal. Op basis van deze gegevens is bij gebruik van een CO₂-laser de veilige afstand (R_v) met nominaal risico voor de diffuus gereflecteerde straling ca. 0,4 tot 0,7 m.

Bewerkingen waarbij materiaal smelt of materiaal wordt weggenomen kenmerken zich door een hogere absorptie, waardoor de stralingsrisico's minder zullen zijn.

4.4 Normering van stralingsrisico's

4.4.1 Overzicht

Met betrekking tot de normering van de maximaal toelaatbare blootstelling aan laserstraling is reeds veel gepubliceerd. (WHO, 1982; VDI, 1987; Ulysse et al 1986; Cleuet, 1980; Philips, 1985). Voor blootstelling aan laserstraling zijn diverse standaards ontwikkeld die onderling niet of slechts op details verschillen (WHO,

1982). De ANSI standaard heeft hierbij als richtlijn gediend. In tabel 4.9 is een overzicht gegeven van enkele van de in omloop zijnde normen voor de maximaal toelaatbare blootstelling (MTB).

Tabel 4.9 Overzicht van in omloop zijnde normen voor maximaal toelaatbare blootstelling (MTB) aan laserstraling

Norm	Uitgifte jaar	Uitgever/Instituut
ANSI 2136.1	1986	American National Standards Institute, Toledo, Ohio
DIN VDE 0837	1986	VDE-verlag Berlin
IEC 825	1984	International Electrotechnical Commission
BS 4803	1983	British Standards Institution, London
BXV 18	1985	Philips, Eindhoven

In bijlage 2 wordt een overzicht gegeven van maximaal toelaatbare blootstelling (MTB) volgens de IEC en DIN VDE norm. De MTB-waarde is afhankelijk van de golflengte en van de blootstellingsduur. Op basis van deze twee parameters kan de MTB-waarde worden bepaald. Voor het oog en voor de huid gelden dezelfde waarden, alleen voor golflengtes tussen 400 en 1400 zijn de MTB-waarden voor het oog (veel) lager. Straling van deze golflengte wordt door de ooglenzen en het hoornvlies gefocusseerd, waardoor de intensiteit op het netvlies zeer veel groter is.

De standaards zijn in principe geldig voor puntbronnen; evenwijdige straling (brede laserbundels) kan ook als straling van een puntbron worden beschouwd. Voor grotere (uitgestrekte) bronnen zijn aparte normen ontwikkeld.

In de normering blijft straling met een golflengte kleiner dan 200 nm buiten beschouwing. Achtergrond hiervan is dat deze straling snel door de lucht wordt geabsorbeerd. Niettemin kan zich op korte afstand van een eximeer-laser tot blootstelling aan straling met een golflengte 193 nm voordoen.

4.4.2 Achtergrond van normen

Bij blootstelling aan straling kunnen zowel acute als chronische (of vertraagde) effecten optreden. Het is derhalve moeilijk eenduidige normen vast te stellen. Er

is een groot aantal verschillende effecten mogelijk bij blootstelling aan intense straling. Parameters hierbij zijn onder meer de golflengte, de blootstellingsduur en het bestraalde oppervlak. Drempelwaarden voor acuut optredend letsel kunnen worden afgeleid uit experimenten en ongevalsgegevens. Voor chronische of vertraagde effecten is dit niet mogelijk. Drempelwaarden hiervoor zijn gebaseerd op epidemiologische gegevens.

De nu in gebruik zijnde normen zijn voor een belangrijk deel gebaseerd op Amerikaanse gegevens. Bij de totstandkoming van de MTB-waarden heeft ook de Amerikaanse visie en wijze van benaderen van deze problematiek een belangrijke rol gespeeld.

Het vaststellen van een veilige waarde voor blootstelling aan straling vindt doorgaans plaats aan de hand van een 'veiligheidsmarge' en die stralingsintensiteit die in 50% van de gevallen schade heeft toegebracht. Deze waarde staat bekend als ED_{50} . Echter ook andere waarden bijvoorbeeld ED_{10} worden wel gebruikt.

De nu vastgestelde maximaal toelaatbare blootstelling (MTB) ligt een factor 5 tot 20 onder de ED_{50} -waarde (WHO, 1982). In een enkel geval gaat men uit van de laagste dosis waarvan bekend is dat deze letsel heeft veroorzaakt.

Bij het vaststellen van de MTB-waarden komen een aantal problemen voor die de totstandkoming ervan hebben bemoeilijkt.

Meetapparatuur: Niet voor alle golflengten is voldoende nauwkeurige meetapparatuur beschikbaar om MTB-waarden met een zekere mate van precisie vast te stellen. Soms zijn verschillende mogelijkheden om te meten beschikbaar die (kleine) verschillen in resultaten kunnen geven.

Herkennen letsel: Het is moeilijk gebleken kleine letsels aan het netvlies waar te nemen. Hiervoor zijn verschillende technieken toegepast die niet altijd overeenkomstige resultaten geven (Harlen, 1978; WHO, 1982).

Data: Data van oogletsel is voornamelijk afkomstig van experimenten met konijnen en rhesusapen. Voor de meeste blootstellings-

condities zijn voldoende gegevens verzameld. Voor lange blootstellingsduur zijn MTB-waarden echter geëxtrapoleerd.

Voor het vaststellen van de maximaal toelaatbare blootstelling van laserstraling met golflengtes tussen 400 - 1400 nm heeft men zich vooral gebaseerd op experimentele gegevens (dierexperimenten). De MTB-waarden voor UV-straling zijn merendeels ontleend aan drempelwaarden voor het ontstaan van photoheraktis (lasogen) bij booglampen en lange termijneffecten van UV-straling op de huid.

Blootstelling aan straling van CO₂-lasers is betrekkelijk goed onderzocht. Het absorptie mechanisme van deze straling wordt goed begrepen waardoor extrapolaties relatief gemakkelijk te maken zijn (Harlen, 1978).

MTB-waarden voor gepulste lasers zijn gebaseerd op een enkele set van data en er zijn studies bekend met andere resultaten. Toepassing van de standaard voor gepulste lasers dient derhalve met grote voorzichtigheid te gebeuren (Harlen, 1978).

4.4.3 Gevarenklassen voor lasers

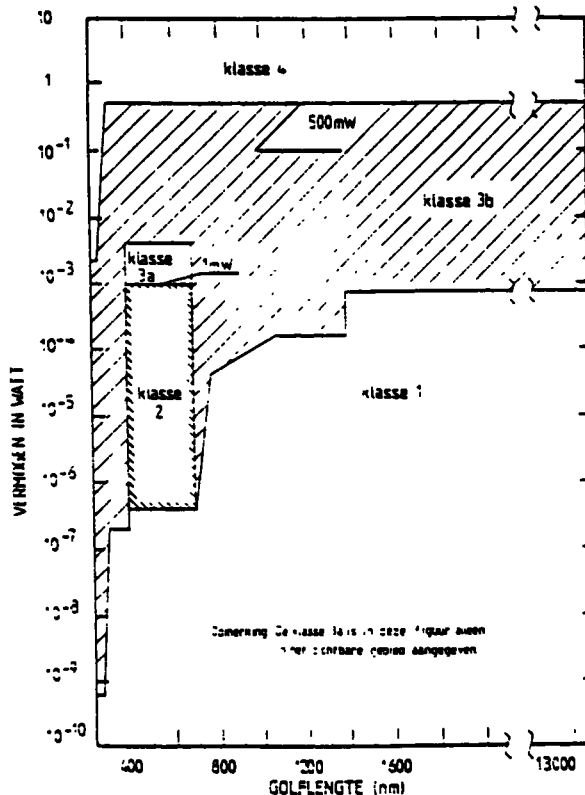
Het vaststellen van de maximaal toelaatbare blootstelling voor laserstraling is een complexe zaak. Om de inschatting van veiligheids- en gezondheidsrisico's te vereenvoudigen en om gemakkelijker maatregelen te kunnen treffen om risico's te verminderen, is besloten een classificatiesysteem op te zetten. Lasers worden hierbij ingedeeld naar het mogelijke gevaar dat zij bij blootstelling betekenen. De oorspronkelijke ANSI-indeling (Harlen, 1978) is op uitgebreide schaal overgenomen. Veiligheidsmaatregelen (FME, 1988; Philips, 1985) zijn op deze klasse-indeling gebaseerd. In tabel 4.10 is deze klasse indeling weergegeven.

Tabel 4.10 Gevaren klassen voor stralingsrisico's bij lasers (Bron: VDE 1987)

Klasse 1	Veilige stralingsbronnen Zelfs onder de meest ongunstige omstandigheden is er geen gevaar door straling. Op geen enkele manier is blootstelling boven de MTB waarde mogelijk.
Klasse 2	Niet geheel veilige stralingsbron In het zichtbare deel van het spectrum wordt een zodanig laag vermogen uitgezonden, dat de oogsluitreflex bescherming biedt. Blijven kijken in de bundel geeft gevaar voor oogletsel.
Klasse 3a	Gevaarlijke stralingsbron De intensiteit is zo laag dat iemand met een ongewapend oog normaal geen letsel zal oplopen. Bij bewust in de bundel kijken, of bij gebruik van optische hulpmiddelen bestaat gevaar voor oogletsel.
Klasse 3b	Gevaarlijke stralingsbron De directe bundel en spiegelend gereflecteerde bundel kan gevaar opleveren, de diffuse reflectie niet.
Klasse 4	Zeer gevaarlijke stralingsbron Lasers met een vermogen van meer dan 0.5 Watt. Kijken in de bundel of spiegelende reflecties en diffuus gereflecteerd licht kunnen oogletsel geven. Er bestaat gevaar voor verbranden van de huid en het ontstaan van brand.

Belangrijk is op te merken dat de gevaren klassen betrekking hebben op de gehele apparatuur (dus inclusief bundelgeleiding) en niet strikt op de bundel. Hierdoor is het mogelijk met laserbundels van hoog vermogen toch een klasse 1 laserinstallatie te realiseren.

Figuur 4.8 Grafische weergave van klasseindeling voor lasers (Bron: FME, 1988)



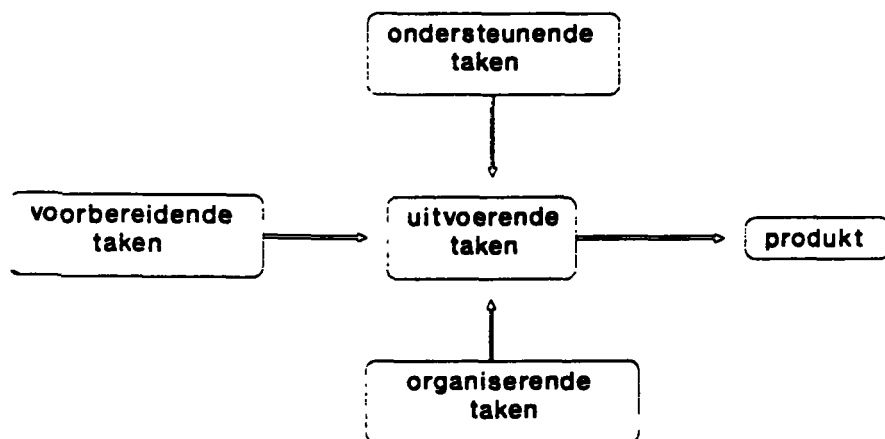
Een belangrijk nadeel van de klasse-indeling is dat slechts een zeer globale indicatie van de risico's wordt gegeven. Bijvoorbeeld het risico van oogletsel door diffuus gereflecteerde straling bij CO₂-lasers is vele malen kleiner dan voor straling van Nd:YAG-lasers. Beide lasers vallen in klasse IV, zeer gevaarlijke stralingsbronnen waarbij ook diffuse reflecties gevaar opleveren. In geval van CO₂-lasers bedraagt de veilige afstand enige centimeters. Voor Nd:YAG lasers kan deze tot enige meters oplopen. Voor de inrichting van werksituaties is dit verschil in veilige afstand van wezenlijk belang.

5. TAKEN, FUNCTIES, EN BLOOTSTELLINGSRISICO'S

Inzicht in de taken, de wijze waarop deze in de praktijk worden uitgevoerd, en de verdeling van taken over verschillende functies en/of afdelingen is van belang om een afchatting van de blootstelling aan verschillende gevaren te kunnen maken. De plaats waar bepaalde taken worden uitgevoerd is bijvoorbeeld van belang om te kunnen nagaan of risico's door blootstelling aan straling of toxische stoffen bestaan. De frequentie van voorkomen en het tijdsbeslag van taken is een maat voor de blootstellingsduur. De bespreking van veiligheids- en gezondheidsrisico's en van de preventieve maatregelen (hoofdstuk 6) wordt aan de taken en functies gerelateerd.

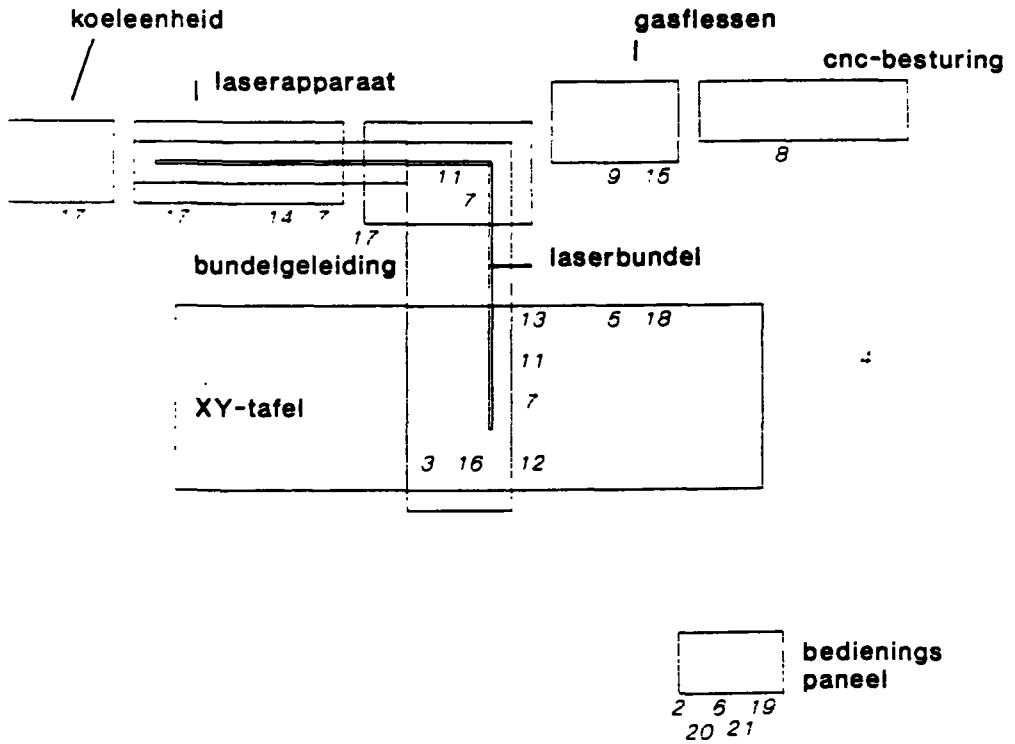
Bij het gebruik van laser voor materiaalbewerking komen een aantal laser- en/of apparatuurgebonden taken voor. In dit hoofdstuk wordt een beknopt overzicht gegeven. Er is hierbij een onderscheid gemaakt naar voorbereidende, ondersteunende, uitvoerende en taken van organiserende aard. De onderlinge samenhang wordt in figuur 5.1 schematisch weergegeven.

Figuur 5.1 Schematisch overzicht van de samenhang tussen voorbereidende, ondersteunende, organiserende en uitvoerende taken.



Gegevens met betrekking tot de taken zijn ontleend aan literatuur, gesprekken met gebruikers (operators, technici), bedieningsvoorschriften en documentatie van fabrikanten. In figuur 5.2 is een lay-out gegeven van een laserstation voor het snijden van metalen. De nummers van de beschreven taken (paragraaf 5.2 t/m 5.4) corresponderen met nummers in de figuur.

Figuur 5.2 Lay-out van een werkstation voor het snijden van metaalplaten met behulp van een laser. Voor verklaring van de cijfers zie tekst.



5.1 Voorbereidende taken

Onder voorbereidende taken worden die taken verstaan die nodig zijn om het eigenlijke werk te kunnen uitvoeren (Pot et al., 1989). Voor laserbewerkingen zijn met name het instellen van de apparatuur, de aanvoer van materiaal en het maken van een proefstuk (test) van belang.

Bij het inregelen en/of instellen van de apparatuur komen de volgende taken voor (de nummers verwijzen met figuur 5.2):

1. maken van een (C)NC programma, inclusief het vastleggen van de operatie-condities van de laser;
2. laden van een (C)NC programma;
3. aanpassen van apparatuur en hulpmiddelen (bijvoorbeeld wisselen van ponsen en stempels bij gecombineerde laser-pons machines), aanpassen van de werkplek aan het produkt (bijvoorbeeld juiste pallets en/of container klaar zetten);
4. voorbereiden materiaal (bijvoorbeeld reinigen, eventueel aanbrengen hulpstoffen);
5. opspannen materiaal.

In de meeste gevallen kunnen deze taken worden uitgevoerd zonder dat de laser is ingeschakeld. Bij deze taken is er derhalve geen blootstelling aan de risico's van laserbundel, -apparatuur en van de bewerking te verwachten.

Het testen omvat (zie figuur 5.2):

6. test CNC-programma;
7. testen afstelling laser en optiek;
8. zondig maken van bijstellingen in instelling van laser apparatuur, optiek en bundelgeleiden of CNC-programma.

Genoemde taken (1 t/m 7) worden op regelmatige basis verricht (bijvoorbeeld , aan het begin van een nieuwe serie produkten).

Het kan nodig zijn het bewerkingsproces van zeer nabij te volgen, eventueel met ingeschakelde laser. Bij ingeschakelde laser bestaat het risico te worden blootgesteld aan de laserbundel. Met name het testen (en bijstellen) van de laser en optiek houdt risico's in. In figuur 5.3 wordt een overzicht van de risico's gegeven.

Het maken van een CNC programma is doorgaans een taak voor de werkvoorbereiding. Bij het testen van het programma, het in- en bijstellen van apparatuur en programma zijn ook de operator en eventueel technici betrokken.

5.2 Ondersteunende taken

Om een goede werking van de laserapparatuur te behouden zijn verschillende werkzaamheden nodig:

- onderhoud en service, meestal gepland en op regelmatige basis;
- reparatie, opheffen van storingen;
- test.

Onderhoud en service

De volgende taken worden tot onderhoud en service gerekend (zie figuur 5.2):

9. verzorgen gastoevoer (wisselen gasflessen);
10. reinigen van de apparatuur;
11. uitlijnen van de bundelgeleiding en optiek;
12. instellen brandpunt (focus);
13. reinigen spiegels en lenzen, reinigen bundelgeleiding;
14. vervangen onderdelen van de laserapparatuur, zoals elektroden, uitkoppelspiegel (bij CO₂-lasers hebben uitkoppelspiegels een beperkte standtijd), flietsbuizen (bij Nd:YAG -lasers), spiegels, vensters en dergelijke;
15. vervangen filters voor reinigen van gassen;
16. verwijderen slakken, afval etc;
17. smeren bewegende delen (bijvoorbeeld pompen).

Figuur 5.3 Globaal overzicht van risico's bij voorbereidende taken.

- = Enig risico
- ◐ = Redelijk risico
- = Aanmerkelijk risico

VOORBEREIDENDE TAKEN	BUNDEL										APPARATUUR				RAND APPARATUUR				BEWERKING				NOTEN
	ongefocuseerde bundel	gefocuseerde bundel	diffuse reflecties	niet geheel diffuse reflecties	hoogspanning	hete en koude vloeistoffen	gasen & vloeistof onder hoge/lage druk	begeleidende straling	toxische stoffen	overige gevaaren	straling	mechanische gevaaren	elektrische gevaaren	straling	toxische stoffen	wegsparrende deeltjes	hete werkstukken	brand - explosie					
1) maken CNC programma																					1) kan op andere apparatuur dan laserstation plaats- vinden		
laden programma																						2) afhankelijk van de aard van de bewerking	
aanpassen apparatuur												○	○									3) snijgas bij smijden	
voorbereken materiaal											○	○	○										
opspannen																							
test CNC programma			○	○																			
testen laser en optrek		◐	◐	◐																			
maken bijstellingen	●	●	◐	◐																			

Voor laserapparatuur wordt vaak een onderhoudsschema aangehouden. Een deel van de werkzaamheden betreft de laser zelf. In de praktijk wordt de service hieraan uitbesteed aan specialisten, bijvoorbeeld de fabrikant. Werkzaamheden aan bundelgeleiding (uitrichten, focuseren, reinigen spiegels) kunnen meestal door speciaal opgeleide onderhoudstechnici van het bedrijf zelf worden uitgevoerd.

In beginsel spelen bij onderhoud en service alle apparatuurgebonden risico's een rol (zie paragraaf 4.2).

Werkzaamheden aan de bundelgeleiding (reinigen, uitlijnen, instellen focus), het reinigen van spiegels en vervangen van uitkoppelspiegels zijn risicovol. Er bestaat het gevaar geraakt te worden door de ongefocuseerde bundel. Met name aan het uitlijnen zijn risico's verbonden omdat dit met ingeschakelde bundel moet plaatsvinden.

Reparatie

Reparatie kan zeer uiteenlopende werkzaamheden omvatten. Afhankelijk van het te repareren onderdeel zijn verschillende mensen bij de reparatie betrokken. Een globale taakverdeling die in de praktijk gehanteerd wordt is:

service monteur:	optiek, resonatorbuis, hoogspanning, besturing;
onderhoudstechnicus:	optiek, mechanisch gedeelte, spiegels, lens, besturing;
operator:	mechanisch gedeelte, assistentie.

Opgemerkt moet worden dat de taakverdeling afhankelijk is van de aard van de op te heffen storing, de apparatuur en de kennis en vaardigheden van de betrokkenen.

Test

Testen vormt een integraal onderdeel van onderhouds- en reparatiewerkzaamheden. Vaak is hierbij inschakeling van de laser nodig.

Figuur 5.4 Globaal overzicht van risico's bij ondersteunende taken.

ONDERSTEUNENDE TAKEN	BUNDEL				APPARATUUR				RAND APPARATUUR				BEWERKING					
	ongefocusseerde bundel	gefocusseerde bundel	diffuse reflecties	niet geheel diffuse reflecties	hoogspanning	hete en koude vloeistoffen	gasen & vloeistof onder hoge/lage druk	begeleide straling	toxische stoffen	overige gevaren	straling	mechanische gevaaren	electrische gevaaren	straling	toxische stoffen	vegsparrende deeltjes	hete werkst...-en	brand - explosie
TAKEN																		
verzorgen gastoever								5										
reinigen randapparatuur																		
uitlijnen optiek																		
reinigen bundel- geleiding																		
instellen focus																		
reinigen spiegels/lenzen																		
vervangen filters																		
verwijderen slak & afval e.d.																		
smeren pompen, kleppen etc.																		
vervangen onder- delen laser																		
reparaties optiek																		
mech. deel																		
laser																		
laser																		

- = Enig risico
- ◐ = Redelijk risico
- = Aanmerkelijk risico

NOTEN

4) reparatie: herstel na storing, reparatie omvat altijd testcycli

5) bij extreem-lasers Cl₂ of F₂

6) er kunnen zich toxische stoffen in filters of leidingen bevinden

Bij reparatie en test bestaat een verhoogd risico aan blootstelling van apparatuur, laserbundel en randapparatuur (zie paragraaf 4.1 en 4.2). Vaak is het nodig te werken met (deels) ingeschakelde apparatuur. Soms moeten ook afschermingen worden verwijderd en beveiligingen tijdelijk worden overbrugd.

Een overzicht van de risico's bij ondersteunende taken is weergegeven in figuur 5.4.

5.3 Organiserende taken

De aard van de organiserende taken (bijvoorbeeld het maken van een detailplanning, afstemming van werkzaamheden door medewerkers onderling) maakt dat er grote verschillen van situatie tot situatie kunnen optreden. De organiserende taken en de invulling ervan in de praktijk zijn met name van belang voor veiligheidsprocedures, en de wijze waarop in mogelijk gevaarlijke situaties wordt samengewerkt.

5.4 Uitvoerende taken

Met de uitvoerende taken is de meeste tijd gemoeid. De taken omvatten (zie figuur 5.2):

18. aan- en afvoer materiaal en werkstukken (evt. opspannen);
19. bewaken bewerkingsproces en apparatuur;
20. het verrichten van bijstellingen;
21. besturen van het proces.

Genoemde taken worden uitgevoerd met ingeschakelde laser.

Met name operators staan bloot aan de risico's van de bewerking en van de (gefocuseerde) laserbundel. Deze risico's zijn besproken in paragraaf 4.1 en 4.3. Voor een globaal overzicht wordt verwezen naar figuur 5.5.

FIGUUR 5.5 Overzicht van risico's bij uitvoerende taken.

- = Enig risico
- ◐ = Redelijk risico
- = Aanmerkelijk risico

UITVOERENDE TAKEN	RISICO'S																	
	BLIND			APPARATUUR			RAND APPARATUUR			BEWERKING								
TAKEN	ongefocusseerde bundel	gefocusseerde bundel	diffuse reflecties	niet geheel diffuse reflecties	hoogspanning	hete en koude vloeistoffen	gassen & vloeistof onder hoge/lage druk	begeleidende straling	toxische stoffen	overige gevaaren	straling	mechanische gevaaren	elektrische gevaaren	straling anders dan laserstraling	toxische stoffen	wegspattende deeltjes	hete werkstukken	brand - explosie
BOREN Aan- afvoer werkstukken	●	●	●	●														○
bewaken																		○
bijstel- lingen																		○
besturen																		○
SNIJDEN Aan- afvoer																		○
bewaken																		○
bijstel- ling																		○
besturing																		○
LASSEN Aan- afvoer																		○
bewaken																		○
bijstelling																		○
besturen																		○

NOTEN

Gevaaren zijn sterk afhankelijk van de exacte inhoud van de taken, de inrichting van de werksituatie en de operatie-parameters.

5.5 Ongevalsegevens

Gegevens over ongevallen met industrieel toegepaste lasers in Nederland zijn niet voorhanden. Wel zijn uit buitenlandse bronnen data bekend. Een probleem echter is dat slechts gedeeltelijk is te achterhalen welke omstandigheden tot blootstelling aan laserbundels hebben geleid. In deze paragraaf wordt een korte review van beschreven ongevallen en incidenten gegeven.

Rockwell (1984) meldt 46 ongevallen met lasers in de periode 1970-1980 in de U.S.A. De data zijn echter onvolledig en slechts ten dele geverifieerd, en derhalve alleen als een eerste schatting bruikbaar. Netvliesbeschadiging is tot nu toe de ernstigste verwonding geweest. Daarnaast komen brandwonden voor. Een enquête in de USA geeft aan dat tenminste 100 ongevallen hebben plaatsgevonden (WHO, 1982). Tot 1970 zijn weinig ongevallen bekend met gepulste lasers, vermoedelijk als gevolg van de zeer kleine kans dat een laserbundel het oog treft.

Uit een controle onder 726 laserwerkers werden over een periode van 9 jaar 2 waarschijnlijke en 2 vermoedelijke gevallen van oogletsel door laserbundels gerapporteerd (Friedman, 1978). Voor de betrokken werkers was het letsel niet of nauwelijks merkbaar. Friedman merkt op dat een routinecontrole, gezien de getroffen voorzorgsmaatregelen bij de apparatuur, niet zinvol is.

Een Chinese studie (Haifeng et al, 1989) maakt melding van 29 ongevallen, veroorzaakt door blootstelling aan laserbundels. In 13 gevallen werd het ongeval veroorzaakt door directe bundel, in de overige gevallen door (spiegelende) reflecties. Van alle ongevallen deden 28 zich voor bij het uitlijnen en afstellen van de laserbundel.

Naast ongevallen kunnen zich incidenten voordoen die niet leiden tot persoonlijk letsel, maar beschadigingen aan apparatuur teweeg brengen. Met name bij snijden hebben (spiegelende) reflecties tot gevaarlijke situaties geleid (Rockwell, 1989). In de literatuur worden dergelijke incidenten echter nauwelijks beschreven.

Een bijzonder gevaar wordt gevormd door de hoogspanning in de laserapparatuur. Aanraking van de hoogspanning heeft tot dodelijke ongevallen geleid (Chang, 1986).

De oorzaken van ongevallen zijn door Rockwell (1984) en Haifeng (1989) onderzocht. De volgende oorzaken worden genoemd:

- onverwachte blootstelling gedurende uitlijnen;
- slechte optische uitlijning, waardoor onbedoelde blootstelling optreedt;
- beschikbare oogbescherming (bril) wordt niet gebruikt;
- storing in de apparatuur;
- onveilige werkmethode bij werken met hoge spanningen;
- onbedoelde blootstelling van onbeschermd toeschouwers;
- werken met onbekende apparatuur;
- gebrek aan bescherming tegen begeleidende gevaren;
- vereiste voorzorgsmaatregelen worden niet getroffen, er komen open bundels voor;
- betrokkenen zijn zich onvoldoende bewust van gevaren;
- slechte samenwerking, communicatie stoornissen.

6. PREVENTIEVE MAATREGELEN

6.1 Algemene strategie bij beperking van risico's

Voor de beperking van risico's (zowel voor wat betreft veiligheid als voor gezondheid) kan worden uitgegaan van een strategie, waarbij de volgende prioriteit van maatregelen wordt gehanteerd.

1. Aanpak bij de bron

In eerste instantie moet getracht worden risico's door maatregelen aan de bron weg te nemen of te zorgen dat de risico's niet ontstaan. Dit is bijvoorbeeld mogelijk door het bewerkingsproces te wijzigen of te kiezen voor andere apparatuur (bijvoorbeeld een CO₂-laser kiezen in plaats van een Nd:YAG-laser of de bewerking op conventionele wijze uitvoeren). Ook kunnen bewerkingscondities zo worden gekozen dat de risico's minimaal zijn.

2. Beperken van de overdracht naar de mens

Als het niet mogelijk is de risico's in voldoende mate bij de bron te bestrijden dan kan overwogen worden de overdracht naar de mens te reduceren. Voorbeelden van dit type maatregelen zijn het afschermen van de laserbundel, onderbrengen van een laser in een aparte ruimte, het afzuigen van toxische stoffen of het vergroten van de afstand tussen mens en laserapparatuur.

3. Beperking van de blootstellingsduur

Een reductie van de blootstelling aan toxische stoffen is het terugbrengen van de blootstellingsduur een mogelijkheid. Veiligheidsrisico's kunnen op deze wijze in mindere mate worden verminderd.

4. Organisatorische maatregelen

In sommige gevallen kunnen risico's met procedures en regelgeving worden beperkt.

5. Gebruik van persoonlijke beschermingsmiddelen

Tot het gebruik van persoonlijke beschermingsmiddelen (laserbril, beschermende kleding of adembescherming) moet pas worden overgegaan als het niet mogelijk is risico's op andere wijze tot een aanvaardbaar niveau te reduceren.

6.2 Maatregelen

Overzichten van maatregelen en voorzieningen bij lasers worden onder anderen gegeven door FME (1988) en VDE (1987). In bijlage 3 zijn deze overzichten opgenomen.

6.2.1 Beperking van risico's bij de bron

Voor beperking van de risico's bij de bron zijn er een aantal mogelijkheden.

Keuze van het bewerkingsproces

Omdat met de invoering van lasers in de regel hoge investeringen gemoeid zijn, wordt de keuze tussen laserbewerking en traditionele bewerking doorgaans weloverwogen genomen. Een evaluatie van de veiligheids- en gezondheidsrisico's zou deel moeten uitmaken van het keuzeprocess.

Keuze van het type laser

Ook de keuze van het type laser is van invloed op veiligheids- en gezondheidsrisico's. Nd:YAG-lasers vormen een risico voor het netvlies, terwijl CO₂-lasers dat niet doen. Eximeer-lasers zijn door hun golflengte (UV-straling) en door de gebruikte gassen (F₂, CL₂) bijzonder risicovol. De keuze hangt mede af van het te bewerken materiaal. Bijvoorbeeld de reflectiecoëfficiënt van metalen is bij

Nd:YAG-lasers beduidend lager dan bij CO₂-lasers. Keuze voor een Nd:YAG-laser kan derhalve de stralingsrisico's door diffuus reflecterende straling in bepaalde situaties verminderen. Door middel van het aanbrengen van coatings en absorberende materialen is getracht reflecties terug te brengen.

Instelling van operatie-parameters

De instelling van de operatie-parameters is eveneens van invloed. Een juiste instelling bij snijden kan emissie van stoffen bij lasersnijden beperken. Ook het gebruik van een waterstraal in plaats van een snijgas heeft gunstige invloed op de emissie (Haferkamp et. al., 1990). Het is zinvol niet met een hoger vermogen te werken dan strikt noodzakelijk is. De veilige afstand tot de stralingsbron wordt hierdoor beperkt. Het is niet mogelijk gebleken om binnen het kader van deze studie de relaties tussen alle mogelijke operatie-parameters en veiligheids- en gezondheidsrisico's te onderzoeken.

Ontwerp van de apparatuur

In het ontwerp van de bewerkingsapparatuur kan met een aantal maatregelen het veiligheids- en gezondheidsrisico's worden beperkt:

- gebruik van toxische stoffen tot een minimum beperken;
- laserbundel hoog boven of ver onder ooghoogte laten lopen;
- bundel in verticale richting laten uittreden;
- gebruik van een verzwakker (t.b.v. stand-by toestand van de laser);
- laserbundel opvangen met een bundelvanger;
- opsluiten van de laserbundel.

6.2.2 Beperking van de overdracht, beschermende maatregelen

Nabij de laserapparatuur kan op verschillende wijzen een vermindering van risico's bereikt worden. Er is een onderverdeling gemaakt naar de aard van de maatregelen.

Afschermen

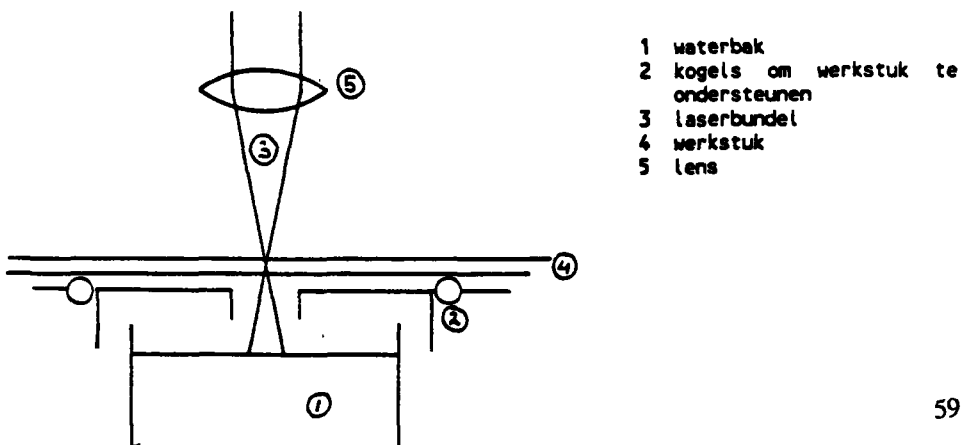
Blootstelling aan stralingsrisico's kan onder andere worden verminderd door de laserbundel en eventuele reflecties af te schermen. De volgende maatregelen zijn mogelijk:

1. zoveel mogelijk opsluiten laserbundel;
2. opvangen laserbundel met bundelvanger;
3. afschermen van diffuse reflecties;
4. omkasten of plaatsen van laser in aparte ruimte;
5. afscherming van spanningvoerende delen;
6. afscherming voor röntgenstraling.

Ad 1 De laserbundel wordt in een niet toegankelijke buis of balg geleid en aan het eind met een bundelvanger opgevangen.

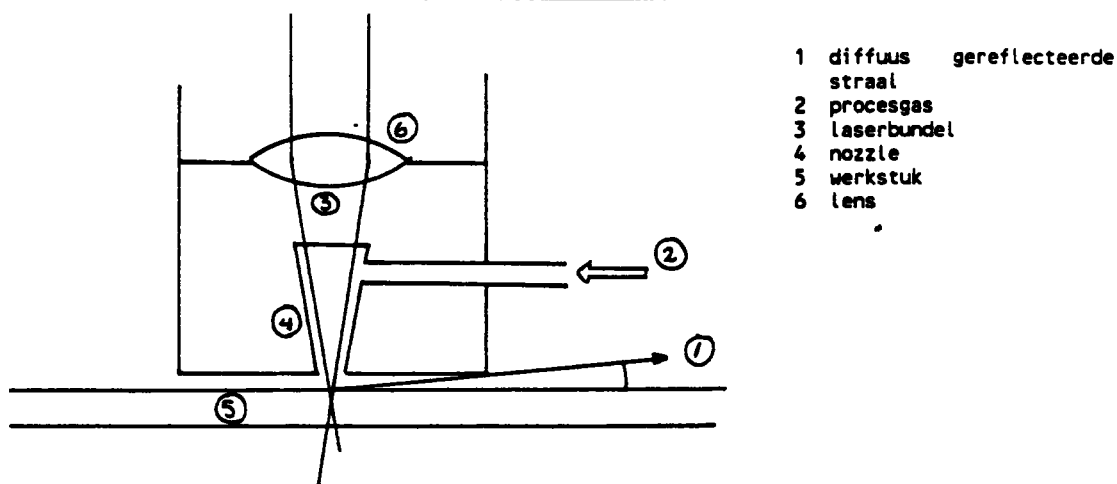
Ad 2 Het opvangen van de laserbundel is nodig indien het mogelijk is dat de laserbundel geen werkstuk raakt (bijvoorbeeld bij snijden vanuit een ponsgat). Het effectief opvangen van de bundel is in de praktijk vooral goed mogelijk bij een vaste optiek (en een bewegend werkstuk). Bij bewegende optieken is het mogelijk dat de bundel wordt gereflecteerd op pennen of staven voor ondersteuning van werkstukken. Straling van CO₂-lasers kan goed met water worden geabsorbeerd. Een dergelijke opbouw vermindert ook het risico van een spiegelend gereflecteerde bundel. Bij 3D-bewerkingssystemen en laserrobots is een effectief opvangen van bundels niet mogelijk.

Figuur 6.1 Mogelijkheid om laserbundels op te vangen



Ad 3 Bij snijden van vlakke platen kan diffuus reflecterende straling effectief worden verzwakt door toepassing van een vlakscherm wat zich dicht boven de plaat bevindt (figuur 6.2). Alleen zeer vlak reflecterende straling kan hierbij uittreden. Omdat de gereflecteerde intensiteit evenredig is met de cosinus van de reflectiehoek (zie vgl (4.3)) zal deze zeer laag zijn. Er dient voor gezorgd te worden dat de reflecterende straling kan worden geabsorbeerd.

Figuur 6.2 Reductie van diffuus reflecterende straling bij snijden van vlakke plaat



Ad 4 Afscherming van de laser, inclusief de bewerkingszone is nodig bij 3D-bewerkingsystemen en laserrobot. Ook plaatsing van de laser in een afgesloten (en onbemande) ruimte is mogelijk. Voor de wanden worden diffuus reflecterende of absorberende, niet-brandbare materialen aanbevolen. Afscherming is bij bewerking van kleine werkstukken relatief gemakkelijk te realiseren. Voor transparante delen (kijkglazen, observatiesystemen) geldt dat voldoende demping van het laserlicht moet plaatsvinden. Het ontwerp van afschermingen is afhankelijk van de de uitgevoerde bewerking, het lasertype, de bewerkingscondities en de afmetingen van de werkstukken.

Aanbrengen van beveiligingen

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. Maatregelen zijn:

- schakelaars die de laser uitschakelen bij opening van apparatuurkasten;
- geen automatische 'reset' van voedingsspanning na uitschakeling;
- sleutelschakelaar voor activeren;
- toegangsbeveiliging van de laserruimte;
- dubbel uitgevoerde omhulling van laserbundel;
- aanbrengen van een permanent aanwezige bundelverzwakker.

Afzuiging

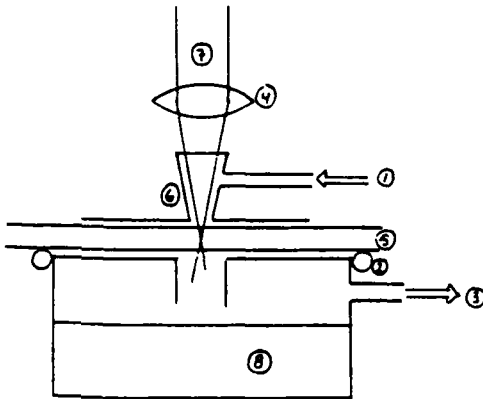
Lokale afzuiging kan een effectieve methode zijn om vrijgekomen stoffen weg te nemen en blootstelling te verminderen. Het gebruik van een lokale afzuiging is goed mogelijk bij het snijden van vlakke plaatmaterialen en vlakke lasconstructies. Voorbeelden van constructies zijn in figuur 6.3 afgebeeld. Bij 3D-snijsystemen, laserrobots en bij niet-vlakke lasconstructies is plaatselijke afzuiging minder goed mogelijk. Omkasting of het plaatsen van de laser in een aparte ruimte is eveneens effectief om blootstelling van toxische emissies van de bewerking te beperken. Bovendien is ruimtelijke afzuiging goed mogelijk. Bij het ontwerp van de afzuiginstallatie en de toegepaste filters moet rekening gehouden worden met de aard van de vrijkomende stoffen de gasstromen en het verspreidingsgedrag van toxische stoffen.

Vergroting van de afstand

Vergroting van de afstand is effectief om de blootstelling aan toxische stoffen te verminderen en de risico's van difuus relecterende straling te verminderen. De veilige afstand bij (niet) gefocusseerde bundels is zo groot dat vergroting van de afstand geen reëel alternatief is om deze risico's te verminderen.

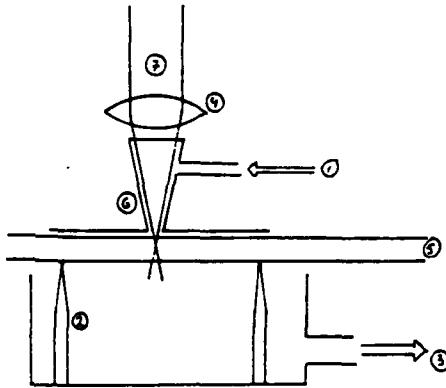
Figuur 6.3 Mogelijkheden voor constructie voor afzuiging bij het snijden van vlakke plaat.

A.



- 1 procesgas
- 2 kogel voor ondersteuning werkstuk
- 3 afzuiging
- 4 lens
- 5 werkstuk
- 6 nozzle
- 7 laserbundel
- 8 waterbak

B.



- 1 procesgas
- 2 ondersteuning werkstuk
- 3 afzuiging
- 4 lens
- 5 werkstuk
- 6 nozzle
- 7 laserbundel

Inrichting van de werkplek

Een weloverwogen werkplekinrichting kan bijdragen aan verkleining van veiligheids- en gezondheidsrisico's. Enige mogelijkheden zijn:

- afzuiging zo opstellen dat verontreinigde lucht van de werker af beweegt, rekening houdend met de gasstromen en het verspreidingsgedrag van toxische stoffen;
- plaatsing bedieningsmiddelen op enige afstand van de plaats van verwerking;
- gebruik van (verzwakkende) optische hulpmiddelen om bewerking te kunnen volgen;

- opstelling van werkplek zodanig dat toevallig optredende reflecties of uit-tredende bundels de operator niet treffen;
- gebruik van afstandsbediening en TV monitoren.

6.2.3 Beperking van de blootstellingsduur

Beperking van de blootstellingsduur kan de risico's van straling en blootstelling aan toxische stoffen verminderen. Er zijn een aantal mogelijkheden de blootstel-lingsduur te beperken.

1. Rouleren van de werkzaamheden over verschillende personen, zodanig dat de gemiddelde blootstelling per dag van een toelaatbaar niveau wordt.
2. Automatisering van de bewerking, zodanig dat de betrokken medewerkers slechts gedurende een beperkte tijd in de nabijheid van de bewerking hoe-ven zijn.
3. Verhoging van de bedrijfszekerheid van de apparatuur en een reductie van de service gevoeligheid vermindert de tijd die nodig is om reparaties en bijstelling (met hoog risico) uit te voeren.
4. Preventief onderhoud kan het aantal storingen en daarmee het aantal repa-raties verminderen.

6.2.4 Organisatorische maatregelen

Door middel van procedures, voorschriften en de organisatie van de werkzaam-heden kan men veiligheids- en gezondheidsrisico's verminderen. De effectiviteit van procedures en voorschriften is niet altijd hoog. Een aantal maatregelen is verplicht. Voorbeelden van maatregelen van organisatorische en procedurele aard zijn:

1. Zorgen voor voldoende kennis van risico's en voorschriften met betrekking , tot straling en hoogspanning.
2. Schriftelijke bedieningsvoorschriften.
3. Niet toelaten van toeschouwers.

4. Lijst van personen die bij de laser aanwezig mogen zijn.
5. Uitvoeren van reparaties en onderhoud met tenminste twee personen.
6. Regelmatige controle op goede werking beschermingsmiddelen.

6.2.5 Persoonlijke beschermingsmiddelen

Het gebruik van persoonlijke beschermingsmiddelen om risico's te beperken moet zoveel mogelijk worden vermeden. Persoonlijke beschermingsmiddelen moeten alleen worden toegepast als het niet mogelijk is de risico's op andere wijze te reduceren. Bij een aantal werkzaamheden aan of bij laserapparatuur, met name als onverwacht blootstelling aan laserstraling mogelijk is, moeten persoonlijke beschermingsmiddelen worden gedragen. Voor bescherming tegen laserstraling zijn nodig:

1. laserbril;
2. handschoenen;
3. kleding.

Laserbril

In de literatuur zijn eigenschappen van laserbrillen vrij uitvoerig beschreven (Cleuet, 1980; Ulysse, 1986; Swearngen, 1988).

Eisen die aan laserbrillen moeten worden gesteld (Cleuet, 1980; Ulysse, 1986; Philips, 1985) zijn:

1. beide ogen moeten volledig worden beschermd, ook tegen straling die van opzij invalt;
2. glazen mogen niet gemakkelijk uit het montuur verwijderbaar zijn;
3. glazen moeten een goede optische kwaliteit hebben, mogen geen vervorming geven;
4. de brillen moeten schok- en hittebestendig zijn;
5. de bril moet aangepast zijn aan de golflengte van de laser;
6. de straling moet zodanig gedempt worden dat op de werkplek geen overschrijding van de maximaal toelaatbare blootstelling ontstaat;

7. de glazen mogen hun filterende werking niet verliezen;
8. de golflengte waarop de bril werkzaam is moet onuitwisbaar op de glazen zijn aangebracht.

De vereiste demping van de straling kan worden afgeleid uit de stralingsintensiteit op de werkplek.

Voor de eisen aan laserbrillen zijn verschillende normen opgesteld, verwezen wordt naar CEN 207, CEN 208 en ISO 6161 (Ulysse, 1986); DIN 58219, DIN 58215 (VDI, 1989).

Een van de belangrijkste nadelen van laserbrillen is de vaak hoge demping van zichtbaar licht. Met name het werken met beeldschermen wordt hierdoor bemoeilijkt.

Handschoenen

Handschoenen dienen te zijn vervaardigd van niet-brandbaar materiaal. Het dragen van handschoenen is nodig als de maximaal toelaatbare blootstelling wordt overschreden, bijvoorbeeld bij het hanteren van materialen nabij de laserbundel.

Kleding

Kleding moet zijn vervaardigd van niet-brandbaar materiaal, het moet gedurende enige tijd in tact blijven als het door een laserbundel wordt getroffen.

Adembescherming

Bij vrijkomen van toxische stoffen kan het gebruik van adembescherming nodig zijn.

7. AANBEVELINGEN VOOR FOLLOW-UP

7.1 Inleiding

De oriënterende studie naar veiligheids- en gezondheidsrisico's bij materiaalbewerking met lasers geeft aan dat op een aantal punten de kennis onvoldoende is om risico's te kunnen inschatten en om afdoende, in de praktijk bruikbare, maatregelen te kunnen nemen.

In dit hoofdstuk worden een aantal mogelijkheden geschetst die tot doel hebben de kennis van veiligheids- en gezondheidsrisico's te vergroten, deze kennis toepasbaar te maken en de toepassing ervan in de praktijk te bevorderen.

7.2 Evaluatie risico's bij verschillende bewerkingen

Uit het onderzoek is gebleken dat het afschatten van risico's bij verschillende laserbewerkingen nog in onvoldoende mate heeft plaatsgevonden. Verdieping en verbreding van de kennis om tot een goede risico-evaluatie te kunnen komen is daarom noodzakelijk.

Doel van een onderzoek is het ontwikkelen van methoden om veiligheids- en gezondheidsrisico's bij materiaalbewerking met lasers te herkennen en maatregelen te ontwikkelen om deze risico's te verminderen.

Beoogd wordt om uitgaande van de bewerkingscondities (laservermogen, golf-lengte, materiaal eigenschappen en dergelijke) risico's te evalueren en mogelijkheden voor beperking van risico's hieruit af te leiden. De maatregelen kunnen bijvoorbeeld betrekking hebben op:

- inrichting van een bewerkingscentrum, inrichting van werkplekken en apparatuur;
- aanbevelingen voor bewerkingscondities;
- organisatie van werkzaamheden, taakverdeling over betrokken medewerkers;

- veiligheidsvoorschriften en procedures.

Voor een deel kan een afchatting gemaakt worden aan de hand van reeds bekende gegevens. Voor een ander deel is nader empirisch onderzoek nodig.

De gezamenlijke ontwikkeling van technische en praktische kennis van materiaalbewerking met lasers en maatregelen om veilig en gezond met lasers te kunnen (blijven) werken is van groot belang. In praktische toepassingen is men alleen gebaat met bewerkingscentra die zowel veilig zijn als optimaal produceren.

Er worden een aantal werkzaamheden voorgesteld:

1. Verder ontwikkelen van een methode om veiligheids- en gezondheidsrisico's bij laserbewerkingen af te schatten.
2. Evaluatie van praktische werksituaties. Hierbij komen bijvoorbeeld aan de orde: werkplekinrichting, organisatie van de werkzaamheden, operatiecondities van de bewerkingsapparatuur en bestaande veiligheidsmaatregelen.
3. Ontwikkeling van maatregelen ter vermindering van veiligheids- en gezondheidsrisico's.

7.3 Normen, onderbouwing en toepasbaarheid

Onderbouwing

Uit literatuur is gebleken dat de nu gehanteerde normen niet volledig worden ondersteund door empirische gegevens. Soms zijn normen ontleend aan slechts één of enkele sets van data, of is een extrapolatie gemaakt. Dit geldt met name voor de blootstelling aan laserstraling in het ultraviolet. Nader onderzoek is nodig om normen voor maximaal toelaatbare blootstelling beter te onderbouwen.

Toepasbaarheid

De bestaande normen voor de maximaal toelaatbare blootstelling aan laserstraling zijn complex en in de praktijk moeilijk te hanteren. Ook het berekenen van de veilige afstand kan in de praktijk problemen geven. De klasse indeling van lasers is weliswaar een aanmerkelijke vereenvoudiging, doch geeft onvoldoende houvast

voor een risico-afschatting. Voorgesteld wordt een methodiek te ontwikkelen waarbij de stralingsrisico's bij verschillende bewerkingen en bij onderhouds- en reparatie werkzaamheden op gemakkelijke wijze kunnen worden (ook kwantitatief) ingeschat. De methodiek moet inzicht geven in bestaande risico's en daarnaast indicaties geven voor mogelijke maatregelen. Deze methodiek kan als leidraad dienen bij het beoordelen van de stralingsrisico's bij bestaande lasersystemen (bijvoorbeeld door Arbeidsinspectie of bedrijfsveiligheidsfunctionarissen) en het ontwerpen van veilige laserbewerkingsapparatuur.

7.4 Emissie van schadelijke stoffen

De emissie van schadelijke stoffen bij lasersnijden, boren en sommige oppervlaktebehandelingen is nog slechts in beperkte mate onderzocht. Vooral bij het snijden van kunststoffen komt emissie van complexe mengsels van mogelijke schadelijke stoffen voor.

Het is aan te bevelen nader te onderzoeken in welke mate emissie van schadelijke stoffen voorkomt, hoe het inspreidingsgedrag is en in hoeverre blootstelling aan schadelijke concentraties mogelijk is. Factoren hierbij zijn de aard van het materiaal, de bewerkingscondities, werkplekinrichting en taakvariabelen. Een dergelijk onderzoek moet naast inzicht in de emissie en de bepalende factoren ook aanknopingspunten bieden voor maatregelen ter voorkoming van blootstelling aan schadelijke stoffen. Gedacht kan hierbij worden aan de werkplekinrichting, de keuze van bewerkingscondities van het lasersysteem en het afzuig- en filtersysteem.

7.5 Ongevalsegevens

Wereldwijd zijn betrekkelijk weinig gegevens bekend over ongevallen, bijna-ongevallen en incidenten met industriële lasers. Het documenteren van deze situaties is echter van groot belang om een inschatting te kunnen maken van de omvang van de risico's en om inzicht te verkrijgen in situaties die tot (bijna)

ongevallen hebben geleid. Voor het treffen van preventieve maatregelen is deze informatie onontbeerlijk.

Aanbevolen wordt de mogelijkheid voor het opzetten van een documentatiesysteem voor (bijna) ongevallen en incidenten met lasers in materiaal-bewerking te onderzoeken.

7.6 EUREKA project "Safety in laser-technology"

In Europees verband wordt gewerkt aan het opzetten van een uitgebreid onderzoek op het gebied van laserveiligheid. In dit onderzoek zullen technische aspecten (onder andere het optimaliseren van operatiecondities bij materiaal bewerking) worden gekoppeld aan onderwerpen op het gebied van veiligheid en gezondheid. Een Nederlandse bijdrage aan dit onderzoeksproject kan plaatsvinden in de vorm van één of meer van genoemde voorstellen voor nader onderzoek.

Voordelen van participatie in dit onderzoeks project zijn onder meer:

- door het onderbrengen van technische aspecten en veiligheid en gezondheid in één project bestaan de mogelijkheden voor onderzoek naar integraal ontwerpen van laserbewerkingen;
- er wordt gemakkelijker internationale afstemming op het gebied van normering en regelgeving verkregen;
- de participatie van de industrie maakt het mogelijk maatregelen goed op de praktijk af te stemmen en maakt de kans op succesvolle implementatie groter;
- kennis en ervaring op gebied van veiligheid en gezondheid bij materiaalbewerking met lasers kunnen snel en op een efficiënte wijze verbeterd worden.

7.7 Voorlichting

Gezien de gecompliceerdheid en de aard van de veiligheids- en gezondheidsrisico's bij laserbewerkingen is het goed mogelijk dat de kennis van de risico's en van de te nemen maatregelen in de industrie niet voldoende is. Overwogen kan worden het kennisniveau door middel van bijvoorbeeld voorlichting te verhogen.

8. CONCLUSIES

Aan het onderzoek kunnen de volgende conclusies worden verbonden.

1. Bij het werken met lasers voor materiaalbewerking komen risico's voor met betrekking tot veiligheid en gezondheid. Deze risico's zijn van uiteenlopende aard en kunnen betrekking hebben op:

- laserbundel (stralingsrisico's);
- laserapparatuur (elektrische (hoog)spanning, hete of koude gassen of vloeistoffen, vloeistoffen en gassen onder hoge of lage druk, straling en toxische stoffen);
- bewerking (straling, toxische stoffen, wegsplattendes deeltjes, hete werkstukken);
- bewerkingsapparatuur (bijvoorbeeld mechanische gevaren).

2. Voor de maximaal toelaatbare blootstelling (MTB) aan laserstraling zijn uitgebreide en complexe normen opgesteld. De interactie van laserlicht met ogen en huid is echter nog niet volledig begrepen. Met name met betrekking tot laserstraling in het UV-gebied (van eximeer-lasers) zijn bestaande normen nog niet volledig onderbouwd.

De normen zijn in de praktijk niet erg gemakkelijk te hanteren. Een vereenvoudiging in de vorm van een classesysteem geeft weliswaar gemakkelijk een indruk van de stralingsrisico's, maar biedt bij het treffen van maatregelen bij lasers voor materiaalbewerking onvoldoende houvast.

3. Veiligheids- en gezondheidsrisico's kunnen globaal worden ingeschat aan de hand van gegevens over de inrichting van bewerkingsystemen en de uitgevoerde bewerking.

Het ontstaan van veiligheids- en gezondheidsrisico's bij verschillende bewerkingen is nog niet volledig doorgrond. Teneinde adequate preventieve maatregelen te kunnen nemen is op dit gebied nader onderzoek vereist. Dit onderzoek kan eventueel in EUREKA verband plaatsvinden.

4. **Blootstelling aan stralingsrisico's gerelateerd aan de laserbundel kan ondermeer voorkomen in de volgende situaties:**
 - = onderhoud en reparatie;
 - = uitlijnen en focuseren van de laserbundel;
 - = bewaken van bewerkingsprocessen;
 - = bij storingen in laserapparatuur en bundelgeleiding, met name bij laser-robots.

5. **Voor een deel van de stralingsrisico's zijn passende preventieve maatregelen mogelijk. Dit is met name het geval voor snijden van vlakke materialen. Bij bewerking van gekromde oppervlakken en werken met laserrobots zijn risico's moeilijker te beperken.**

6. **Bij snijden en boren met lasers kunnen toxische gassen, dampen en aërosolen vrijkomen. De emissie is nog slechts in beperkte mate onderzocht. Bij metaalbewerking liggen emissies bij gebruik van een lokale afzuiging beneden MAC-waarden, met uitzondering van zeswaardig chroom, dat vrijkomt bij snijden van CrNi-staalsoorten. Het snijden van kunststoffen leidt tot het ontstaan van complexe mengsels van deels toxische stoffen. Ook het vrijkomen van kankerverwekkende stoffen is aangetoond.**

7. **In de toekomst zullen lasers met betere prestaties (bijvoorbeeld een groter vermogen) beschikbaar komen. Ook nieuwe bewerkingswijzen zijn in ontwikkeling. Dit impliceert dat ook nieuwe veiligheids- en gezondheidsrisico's kunnen ontstaan.**

LITERATUUR

- ANON. De toepassing van de laser. PT werktuigbouw, 44 (1989) 6/7 p. 94 - 101.
- ARBEIDSINSPECTIE. Voorlopige richtlijnen voor de bescherming tegen de gevaren van lasers. Voorburg, DGA, 1970.
- ARBEIDSINSPECTIE. Chloor, veilige behandeling in de haven, P 92. Voorburg, DGA, 1982.
- ARBEIDSINSPECTIE. Fluor, veilige behandeling in de haven, P 96. Voorburg, DGA, 1982.
- ARBEIDSINSPECTIE. CV-blad Werken met CNC-machines. Den Haag, DGA, verschijnt in 1991 a.
- ARBEIDSINSPECTIE. CV-blad Werken met robots. Den Haag, DGA, verschijnt in 1991 b.
- ARBO-jaarboek 154 - 163, 464 - 467. Amsterdam (etc.), NIA (etc.) 1990.
- BACH, F.-W. HAFERKAMP, H. VINKE, T. WITTBECKER, J.-S. Staub-, Aerosol-, Gasemissionen beim Laserschneiden. Laser Magazin, (1988)1, pp. 23 - 25.
- BONNEY, M.C., YONG, Y.F. Robot Safety. Berlin, Springer Verlag, 1985.
- BURNETT, W.D. Evaluation of Laser Hazards to the Eye and the Skin. Am. Ind. Hygiene Assoc. J. 30 (1969) 582 - 587.
- CHANG, I. Laser safety. Professional Health, (1986) 11, p. 50 - 53.
- CHEMIEKAARTEN. Gegevens over veilig werken met chemicaliën. Alphen aan den Rijn, (etc.), Samsom, 1988.
- CLEUET, H., MAYER, A. Risques liés à l'utilisation industrielle des lasers. Cahiers de notes documentaires, (1980) 90 p. 207 - 222.
- DIN-VDE. Laser, Sicherheitstechnische Festlegungen für Lasergeräte und -anlagen, Normen. Berlin, VDE-verlag, 1987.
- DOYLE, D.J., KOKOSA, J.M. Hazardous by-products of plastics processing with carbondioxide (CO₂) lasers. In: Albright, C. (ed), Laser welding, machining and Materials processing. Bedford, Proceedings ICALEO, IFS Ltd, pp. 201 - 203, 1985.
- EUREKA. Workshop laser safety, Hannover, 30-31 oct 1990. Hannover, Laser Zentrum Hannover e.V., 1990.
- FLETCHER, M.J. Some laser safety guidance- but what about by-products? Welding and Metal Fabrication, (1983) 467-468.
- FME. Laserbewerkingen. Zoetermeer, FME, VM 80, 1988.
- FRIEDMAN, A.I. The ophthalmic screening of laserworkers. Ann. of Occup. Hyg. 21 (1978) 277 - 279.
- GRIESS, G.A., BLANKENSTEIN, M.F. Multiple pulse laser retinal damage tresholds. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 42 (1981) 287 - 292.
- HAFERKAMP, H., BACH, F.W., VINKE, T., WITTBECKER, J.S. Ermittlung der Schadstoffemission beim thermischen Trennen nach dem Laserprinzip. Dortmund, Bundesanstalt für Arbeitsschutz, 1990, Fb 615. Dortmund, 1990.
- HAIFENG, L. ET. AL. Ocular injuries from accidental laser exposure. Health Phys. 56 (1989) 711 - 716.
- HARDWAY, G.A. Lasers in metalworking and electronic industries. Arch. of Environ. Health, 20 (1970) 188 - 192.

- HARLEN, F. The Development of Laser Codes Practice and Maximum Permissible Exposure Levels. Ann. of Occup. Hyg. 21 (1978) 199 - 211.
- HOLZINGER, G., KROY, W., SCHREIBER, P., SUTTER, E. Schutz vor Laserstrahlen. Dortmund, Bundesanstalt für Arbeitsschutz, 1978 (Schriftenreihe Arbeitsschutz nr 14).
- KLOST, W. Sicherheitsmaßnahmen bei der Verwendung von Laserstrahlen. Zentralbl. Arbeitsmed. Arbeitsschutz. 21 (1971) 105 - 111.
- KOEBNER, H. Industrial applications of lasers. Chichester, Wiley & sons, 1984.
- KORBEEK, B.J., RAMPERSAD, H.K. Laser- versus waterstraalsnijden. PT werktuigbouw, 43 (1988) 8, p. 32 - 39.
- KOSTER, T. Laserbewerking, het wapen van de toekomst. PT werktuigbouw, 44 (1989) 2, p. 44 - 47.
- LUXON, J.T., PARKER, D.E., PLOTKOWSKI, P.D. Lasers in manufacturing. Berlin, Springer Verlag.
- MARSHAL, W.J. Hazard analysis in gaussian shaped laser beams. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 41 (1980) 547 - 551.
- PHILIPS, AFD. ARBEIDSBESCHERMING. Veiligheidshandboek, BXV 18, niet-ioniserende straling. Eindhoven, Philips, 1985.
- POT, F.D. ET AL. Functieverbetering en organisatie van de arbeid, Voorburg, DGA, 1989 (S71).
- ROCKWELL, R.J., MOSS, C.E. Optical Radiation Hazards of Laser Welding Processes, Part I: Nd:YAG laser. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 44 (1983) 572 - 579.
- ROCKWELL, R.J. Ensuring Safety in Laser Robotics. Lasers and Applications. 3 (1984) 11, p. 65 - 70.
- ROCKWELL, R.J., MOSS, C.E. Optical Radiation Hazards of Laser Welding Processes, Part II: CO₂ laser. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 50 (1989) 419 - 427.
- SCHRAUWERS, A. Lasersysteem dat alle andere in de schaduw stelt. PT-werktuigbouw, 45 (1990) 6/7 iA30 - iA32.
- STURM, J. Voordracht laserveiligheid. Voorburg, DGA, 1985.
- SWEARENGEN, P.M., VANCE, W.F., COUNTS, D.L. S Study of Burn-through Times for Laser Protective Eyeware. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 49 (1988) 608 - 612.
- ULYSSE, J.F., MAYER, A. Les lasers: Risques et moyens de protection. Cahiers de notes documentaires, (1986) 125 p. 523 - 537.
- VDI. Lasersicherheit, Hochleistungslasers in industriellen Einsatz, Ein Überblick über Unfallrisiken und Sicherheitsvorschriften. Düsseldorf, VDI Technologiezentrum, 1989.
- WAL, J.F. VAN DER. Onderzoek naar de expositie van lassers aan luchtverontreiniging. Voorburg, DGA, 1989 (S 46-1).
- WHO. Lasers and Optical Radiation. Geneve, WHO, 1982 (Environmental Health Criteria 23).
- WIJERS, J.L.C. Nederland - Laserland?. PT-werktuigbouw, 44 (1989) 4, p. 89 - 93.
- WIJERS, J.L.C. Laserveiligheid. PT-werktuigbouw, 44 (1989) 6/7, p. 44 - 47.
- WIJERS, J.L.C. Lasertoepassing gaat niet ongemerkt voorbij. PT-werktuigbouw, 45 (1990) 6/7 p. 44 - 47.

BIJLAGEN

BIJLAGEN

pagina

Bijlage 1	Overzicht geraadpleegde tijdschriften	79
Bijlage 2	Overzicht van normen voor maximaal toelaatbare blootstelling aan laserstralen, conform DIN VDE 0837 9 (1987)	80
Bijlage 3	Overzicht van voorgeschreven veiligheidsmaat- regelen bij lasersystemen	84

Bijlage 1 Overzicht geraadpleegde tijdschriften

Ergonomics

Applied Ergonomics

Zeitschrift für Arbeitswissenschaft

Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz, Prophylaxe und Ergonomie

Journal of Occupational Accidents

American Industrial Hygiene Association Journal

Archives of Environmental Health

International Journal of Industrial Ergonomics

Annals of Occupational Hygiene

American Journal of Industrial Medicine

Polytechnisch Tijdschrift Werktuigbouw

Van genoemde tijdschriften in de inhoudsopgave doorzocht van 1980 tot 1990.

Bijlage 2 **Overzicht van normen voor maximaal toelaatbare blootstelling aan laserstraling, conform DIN VDE 0837 (1987).**

De normen zijn geldig voor blootstelling aan puntbronnen. Hieronder valt het risico van de ongefocuseerde en de gefocuseerde bundel en blootstelling aan (diffuus) gereflecteerde bundels.

Een overzicht van normen voor stralingsbronnen met groot oppervlak is niet opgenomen.

Maximaal toelaatbare blootstelling van de ogen aan laserstraling (UV)

spectr. gebied	golflengte (nm)	blootstellings duur (sec)	waarde
UVC	200 - 302.5	$< 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{10}$ W/m ²
	200 - 302.5	$10^{-9} - 3 \cdot 10^4$	30 J/m ²
UVB	302.5 - 315	$< 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{10}$ W/m ²
	302.5 - 315	$10^{-9} - T_1$	C_1 J/m ²
	302.5 - 315	$T_1 - 3 \cdot 10^4$	C_2 J/m ²
UVA	315 - 400	$< 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{10}$ W/m ²
	315 - 400	$10^{-9} - 10$	C_2 J/m ²
	315 - 400	$10 - 10^3$	10^4 J/m ²
	315 - 400	$10^3 - 3 \cdot 10^4$	10 W/m ²

$$C_1 = 5.6 \cdot 10^4 \cdot t^{0.25} \quad \text{tussen 302.5 nm en 400 nm}$$

$$C_2 = 10^{0.2(\lambda - 295)} \quad \text{tussen 302.5 nm en 315 nm}$$

$$T_1 = 10^{0.8(\lambda - 295)} = 10^{-15} \quad \text{tussen 302.5 nm en 315 nm}$$

Maximaal toelaatbare blootstelling van de ogen aan laserstraling (zichtbaar licht)

spectr. gebied	golflengte (nm)	blootstellings duur (sec)	waarde
Licht	400 - 550	$< 10^{-9}$	$5 \cdot 10^6$ W/m ²
	400 - 550	$10^{-9} - 1.8 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$ J/m ²
	400 - 550	$1.8 \cdot 10^{-6} - 10$	$1.8 \cdot t^{0.75}$ J/m ²
	400 - 550	$10 - 10^4$	100 J/m ²
	400 - 550	$10^4 - 3 \cdot 10^4$	0.01 W/m ²
	550 - 700	$< 10^{-9}$	$5 \cdot 10^6$ W/m ²
	550 - 700	$10^{-9} - 1.8 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-3}$ J/m ²
	550 - 700	$1.8 \cdot 10^{-6} - T_2$	$1.8 \cdot t^{0.75}$ J/m ²
	550 - 700	$T_2 - 10^4$	C_3 J/m ²
	550 - 700	$10^4 - 3 \cdot 10^4$	C_3 W/m ²
		$C_3 = 10^{0.015(\lambda - 550)}$	tussen 550 nm en 700 nm
		$T_2 = 10 \cdot 10^{0.02(\lambda - 550)}$	tussen 550 nm en 700 nm

Maximaal toelaatbare blootstelling van de ogen aan laserstraling (IR)

spectr. gebied	golflengte (nm)	blootstellings duur (sec)	waarde
IR-A	700 - 1050	$< 10^{-9}$	$5 \cdot C_4 \cdot 10^6$ W/m ²
	700 - 1050	$10^{-9} - 1.8 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot C_4 \cdot 10^{-3}$ J/m ²
	700 - 1050	$1.8 \cdot 10^{-6} - 10^3$	$18 \cdot C_4 \cdot t^{0.75}$ J/m ²
	700 - 1050	$10^3 - 3 \cdot 10^4$	$3.2 \cdot C_4$ W/m ²
	1050 - 1400	$< 10^{-9}$	$5 \cdot 10^7$ W/m ²
	1050 - 1400	$10^{-9} - 5 \cdot 10^{-4}$	0.05 J/m ²
	1050 - 1400	$5 \cdot 10^{-4} - 10^3$	$90 \cdot t^{0.75}$ J/m ²
	1050 - 1400	$10^3 - 3 \cdot 10^4$	16 W/m ²
IR-B.-C	1400 - 10 ⁶	$< 10^{-9}$	10^{11} W/m ²
	1400 - 10 ⁶	$10^{-9} - 10^{-7}$	100 J/m ²
	1400 - 10 ⁶	$10^{-7} - 10$	$5600 \cdot t^{0.25}$ J/m ²
	1400 - 10 ⁶	$10 - 3 \cdot 10^4$	1000 W/m ²
$C_4 = 10^{[(\lambda - 700)/500]}$			tussen 700 nm en 1050 nm

Maximaal toelaatbare blootstelling van de huid aan laserstraling

spectr. gebied	golflengte (nm)	blootstellings duur (sec)	waarde
UVC	200 - 302.5	$< 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{10}$ W/m ²
	200 - 302.5	$10^{-9} - 3 \cdot 10^4$	30 J/m ²
UVB	302.5 - 315	$< 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{10}$ W/m ²
	302.5 - 315	$10^{-9} - T_1$	C_1 J/m ²
	302.5 - 315	$T_1 - 3 \cdot 10^4$	C_2 J/m ²
UVA	315 - 400	$< 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{10}$ W/m ²
	315 - 400	$10^{-9} - 10$	C_2 J/m ²
	315 - 400	$10 - 10^3$	10^4 J/m ²
	315 - 400	$10^3 - 3 \cdot 10^4$	10 W/m ²
licht.	400 - 1400	$< 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{11}$ W/m ²
IR-A	400 - 1400	$10^{-9} - 10^{-7}$	200 J/m ²
	400 - 1400	$10^{-7} - 10$	$1.1 \cdot 10^4 \cdot t^{0.25}$ J/m ²
	400 - 1400	$10^3 - 3 \cdot 10^4$	2000 W/m ²
IR-B,-C	1400 - 10^6	$< 10^{-9}$	10^{11} W/m ²
	1400 - 10^6	$10^{-9} - 10^{-7}$	100 J/m ²
	1400 - 10^6	$10^{-7} - 10$	$5600 \cdot t^{0.25}$ J/m ²
	1400 - 10^6	$10^3 - 3 \cdot 10^4$	1000 W/m ²
		$C_1 = 5.6 \cdot 10^4 \cdot t^{0.25}$	tussen 302.5 nm en 400 nm
		$C_2 = 10^{0.2(\lambda - 295)}$	tussen 302.5 nm en 315 nm
		$T_1 = 10^{0.8(\lambda - 295)} \cdot 10^{-15}$	tussen 302.5 nm en 315 nm

Bijlage 3 **Overzicht van voorgeschreven veiligheidsmaatregelen bij lasersystemen.**

In de praktijk is het voldoende als de laserapparatuur voldoet aan de norm IEC 825. De fabrikant moet in dat geval een verklaring afgeven dat de apparatuur aan deze norm voldoet.

nr.	maatregel	1	2	3a	3b	4
E 3	Voldoende bekendheid met stralingsrisico's	A	x	x	x	x
E 4	Voldoende bekendheid met hoogspanningsrisico's in geval van open systemen	x	x	x	x	x
E 5	Voldoende bekendheid met veiligheidsvoorschriften	x	x	x	x	x
E 9	Schriftelijke instructies met bedieningsvoorschrift		A	A	x	x
E 10	Blootstelling van de ogen beperken tot MTB-niveau		x	x	x	x
E 11	Blootstelling van de huid beperken tot MTB-niveau					x
E 12	Informatieve etikettering	A	x	x	x	x
E 13	Waarschuwingborden			x	x	x
E 15	Toegangsrestricties voor de laserruimte			x	x	x
E 18	Geen toeschouwers toelaten			A	A	x
E 19	Ventilatie					x
E 20	Noodschakelaar(s) in de ruimte				A	x
E 21	Extra brandpreventie					x
E 22	Lijst van betrokken personen die in de (bij)ruimte aanwezig mogen zijn				A	x x
E 23	Laserbundel voor het oog afschermen			A	A	A x
E 24	Laserbundel niet op ooghoogte	A	A	A	A	A
E 25	Beperk uittredende laserstraling tot niveau van klasse 1 als laser stand-by is		A	A	x	x
E 26	Spiegelend reflecterende oppervlakken weghouden van de bundel		A	A	x	x
E 29	Afstandsbediening en monitoring					A
E 30	Gebruik juiste laserveiligheidsbril indien blootstelling van de ogen mogelijk is				x	x x
E 31	Optische instrumenten moeten licht verzwakken tot beneden MTB-niveau		x	x	x	x

x = voorgeschreven

A = aanbevolen

Overzicht van voorzieningen bij laserapparatuur.

nr.	voorziening	1	2	3a	3b	4
F 1	Veilige afscherming hoogspanningsgedeelte	x	x	x	x	x
F 2	Informatieve etikettering op laser	A	x	x	x	x
F 3	Geen automatische reset van voedingsspanning na uitschakeling	A	A	A	x	x
F 4	Sleutelschakelaar		A	x	x	x
F 5	Indicatielamp ter signalering dat laser in werking is, of in werking kan komen	A	A	x	x	x
F 6	Aansluitmogelijkheid voor waarschuwingspaneel					x
F 7	Aansluitmogelijkheid voor automatische toegangsbeveiliging					x
F 8	Aansluitmogelijkheid voor "noodschakelaar"				A	x
F 10	Permanent aanwezige verzwakker om uittredende straling te beperken tot niveau klasse 1 voor geval laser stand-by is	A	A	x	x	
F 11	Technische voorzieningen (dubbel uitgevoerd) aan de omhulling van gesloten systeem om te voorkomen dat stralingsniveau toegankelijk wordt boven de grens van de betreffende klasse	x	x	x	x	x

x = voorgeschreven

A = aanbevolen