

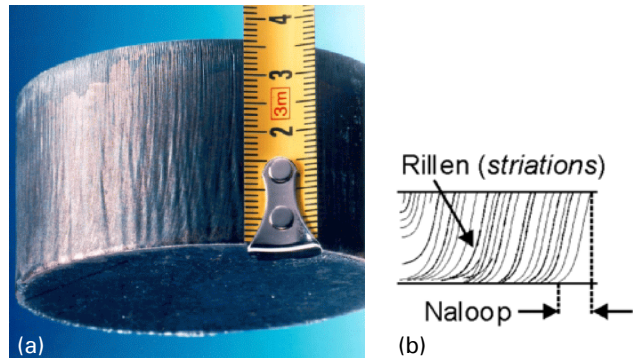
Snijden van metalen met hoogvermogen lasers

Het snijden van metalen met behulp van een hoogvermogen laser biedt vele voordelen ten opzichte van conventionele snijtechnieken. Zo is de snijsnelheid hoger, de snedebreedte kleiner, de bewerking nauwkeuriger en is de warmte beïnvloede zone in het materiaal kleiner. In de voorlichtingspublicatie VM 121 "Hoogvermogen lasers voor het bewerken van metalen" [1] worden verschillende (theoretische) onderwerpen die een rol spelen bij het bewerken (snijden, lassen, oppervlaktebewerken, enz.) van metalen gedetailleerd(er) behandeld. Deze praktijkaanbeveling wil met name inzicht geven in de praktische aspecten die bij het gebruik van een hoogvermogen laser voor het snijden aan de orde komen.

Inhoud

1	Inleiding	1
2	Laserbronnen voor lasersnijden	1
2.1	Opbouw van een laserbron	1
2.2	Eigenschappen van laserstraling en laserbundels	2
2.3	Machine-aspecten	4
3	Snijprincipes	6
4	Parameterinvloeden	6
4.1	Laservermogen en snijsnelheid	6
4.2	Focuspositie	7
4.3	Snijgassen	8
4.4	Startgat	9
4.5	Materiaaleigenschappen	9
5	Karakterisering van de snedekwaliteit	10
6	Overige componenten van een lasersnij-installatie	10
6.1	Opspanning	10
6.2	Sensoren	10
7	Praktijkvoorbeelden	11
7.1	Snijden van een zijgeleiding met CO ₂ -laser	11
7.2	Snijden van pootjukken	11
8	Veiligheid	13
9	Economische aspecten	13
10	Probleemoplosser	14
10.1	Problemen als er een snede is	14
10.2	Problemen bij geen (of onvoldoende) snede	14
10.2.1	Problemen bij geen snede	14
10.2.2	Problemen bij onvoldoende snede	15
11	Literatuur en normen	15
12	Referenties en bronvermelding	15

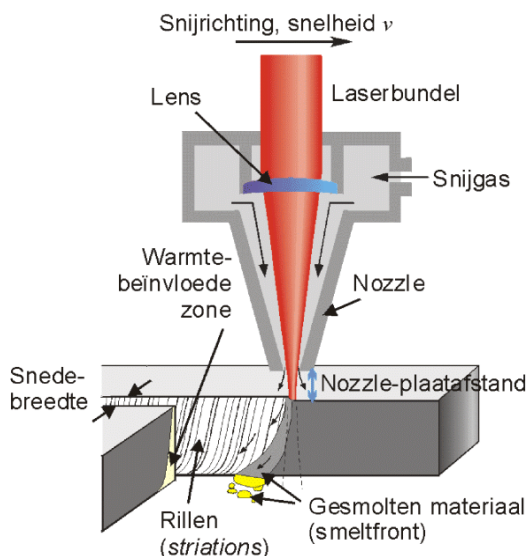
Lasersnijden resulteert in een nagenoeg rechte (haakse) snede en de snijkant vertoont het voor lasersnijden typerende rillenpatroon (*striations*), zie figuren 1.1 en 1.2. Deze ruwheid neemt toe naar de onderzijde van de snede en vertoont bij hoge snelheden en/of dikke materialen enige naloop. Bij een goede uitvoering van het snijproces blijft de ruwheid beperkt tot enige tientallen micrometers (R_z).



figuur 1.2 Snijkant met het voor lasersnijden typerende rillenpatroon (*striations*). Het product is zuurstofgesneden met snijsnelheid 0,4-0,5 m/min.

1 Inleiding

Tijdens lasersnijden wordt de laserbundel gefocuseerd en op het te snijden materiaal geprojecteerd, waardoor het materiaal lokaal smelt en/of verdampt. Het proces wordt vrijwel altijd ondersteund door een snijgas, dat coaxiaal met de laserbundel in de snede wordt geblazen en zo het gesmolten materiaal uitdrijft. Door een beweging van het product t.o.v. de laser- en gasstraal wordt een snede aangebracht (zie figuur 1.1).



figuur 1.1 Het principe van lasersnijden. De laserbundel dient bij voorkeur loodrecht op het productoppervlak in te vallen

In vergelijking met conventionele snijtechnieken levert het lasersnijden de hoogste snijsnelheid (tot circa 15 m/min), de beste snedekwaliteit en is er in de meeste gevallen geen nabewerking nodig (i.v.m. geringe braam aan de onderzijde van de snede). In vergelijking met andere thermische scheidingstechnieken, zoals elektronenbundel-, autogeen- en plasmasnijden, is het lasersnijden nauwkeuriger (50 μm), heeft een kleinere snedebreedte (ongeveer 0,2 mm), zijn scherpe hoeken (15°) in de snijcontouren mogelijk en vertoont het de kleinste warmte beïnvloede zone (minder dan 0,5 mm). In vergelijking met de in het algemeen minder nauwkeurige mechanische scheidingstechnieken, zoals knippen, ponsen en nibbelen, geeft het lasersnijden de meeste vrijheid en flexibiliteit bij het snijden van willekeurige contouren in 2D en 3D producten. Voor wat betreft de flexibiliteit is alleen het waterstraalsnijden een concurrent in de groep van mechanische scheidingstechnieken. Een nadeel van lasersnijden is de beperkte productdiktes (staal tot ca. 20 mm) die economisch gesneden kunnen worden. De relatief hoge investering in een lasersnij-installatie kan echter in veel gevallen snel worden terugverdiend i.v.m. de hoge snijsnelheden.

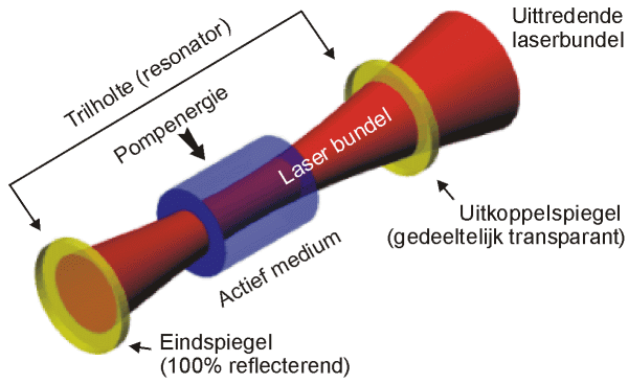
2 Laserbronnen voor lasersnijden

2.1 Opbouw van een laserbron

Het woord LASER is een acroniem voor *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, ofwel lichtversterking door gestimuleerde emissie van straling. Een laserbron waarin de laserstraling wordt opgewekt (zie figuur 2.1) bestaat uit:

- ▶ een trillholte (of resonator) die is opgebouwd uit spiegels, met daartussen

- ▶ een actief medium (CO₂-gas bij een CO₂-laser en een kristal bij een Nd:YAG- en fiberlaser) en
- ▶ een energiebron, die energie in het medium 'pompt'.



figuur 2.1 Principeopbouw van een laserbron

Bij de CO₂-laser wordt de energie elektrisch (elektrische ontlading) in het actieve medium (CO₂-gas) 'gepompt'. Bij de Nd:YAG-laser gebeurt dit 'pompen' d.m.v. licht van flitslampen (lampen-gepompte Nd:YAG-laser) of d.m.v. licht van diodes (diode-gepompte Nd:YAG-laser). De toegevoegde energie wordt in de trillholte omgezet in 'laserlicht', waarvan een klein deel door één van de spiegels (uitkoppelspiegel) wordt doorgelaten (zie figuur 2.1). Dit afgetapte licht is de laserbundel waarmee materialen bewerkt kunnen worden. Het licht van de laserbundel heeft slechts één golflengte (één kleur, zie ook tabel 2.1). De mate waarin laserlicht wordt geabsorbeerd door materialen, hangt af van deze golflengte en de optische eigenschappen van het materiaal (zie § 2.2). De keuze voor een bepaald type laserbron hangt dan ook met deze absorptie samen. Van de totale hoeveelheid toegevoerde (pomp)energie wordt wel 85 tot 97% omgezet in (verlies)warmte (zie tabel 2.1). Afhankelijk van de constructie van de laser en het pompmechanisme en de mogelijkheden van de aansturing van de laserbron, kan de toevoer van laserenergie aan het te bewerken materiaal, gepulseerd of continue plaatsvinden. Continue werkende lasers worden cw-lasers (cw = *continuous wave*) genoemd. Bij het lasersnijden maakt men gebruik van zowel gepulste als cw-lasers (zie figuur 2.12 en hoofdstuk 3). Tabel 2.1 geeft een overzicht van de belangrijkste eigenschappen van de twee lasertypen die het meest geschikt zijn voor het lasersnijden.

tabel 2.1 Overzicht eigenschappen laserbronnen die geschikt zijn voor lasersnijden

laser-type	golflengte	energetisch rendement [%]	vermogen [kW]
CO ₂	10,6 [µm]	10 tot 15	> 20
Diode			
▶ direct	780-1100 nm	30 tot 50	< 10
▶ fiber	780-1100 nm	30 tot 50	< 8
Nd:YAG			
▶ staaf	1,06 [µm]	3 tot 10	4-4,5
▶ disc	1,06 [µm]	20 tot 25	8
Fiber	1,07-1,08 [µm]	30	< 20

Gezien de hoge beschikbare vermogens (meer dan 20 kW) worden CO₂-lasers veel toegepast voor het snijden van relatief dikke (2 tot 35 mm) metalen producten.

De bundelkwaliteit (zie § 2.2) van een diode-gepompte Nd:YAG laser is beter dan van een lampengepompte Nd:YAG-laser, en daarom geschikter voor het lasersnijden. Bovendien hebben diodes een langere standtijd (circa 10.000 uur) dan lampen (circa 1000 uur). Diodes zijn echter duurder dan lampen.

De voordelen van Nd:YAG-lasers t.o.v. CO₂-lasers zijn o.a. dat het Nd:YAG-laserlicht door een glasfiber kan worden getransporteerd (zie § 2.3), en dat het beter wordt geabsorbeerd door metalen (zie § 2.2). Inmiddels zijn Nd:YAG-lasers beschikbaar in vermogens die nodig zijn voor het snijden van wat dikkere (> 2 mm) metalen producten. Voor meer informatie over de werking van de lasers en de eigenschappen van de CO₂- en de Nd:YAG-laser wordt verwezen naar de voorlichtingspublicatie "Hoogvermogen lasers voor het bewerken van metalen" [1].

2.2 Eigenschappen van laserstraling en laserbundels

Een laserbron is niets anders dan een lichtbron, maar wel één met een aantal bijzondere eigenschappen, waarmee het zich onderscheidt van 'normale' lichtbronnen. Eigenschappen, waarvan voor het snijden in het bijzonder gebruik wordt gemaakt, zijn de geringe bundeldivergentie en de hoge vermogensdichtheid.

Vermogensdichtheid

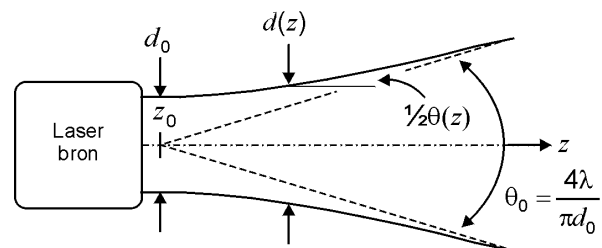
De vermogensdichtheid I [W/m²] is het laservermogen P [W] per oppervlak O [m²] van de bundeldoorsnede. Als d [m] de diameter is van de laserbundel, dan is de vermogensdichtheid gelijk aan:

$$I = \frac{P}{O} = \frac{4P}{\pi d^2} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (2.1)$$

Met een laserbundel kunnen vermogensdichtheden tot circa 10²⁰ W/m² worden bereikt (met snijbranden circa 10⁴ W/m²). Het voordeel van de hoge vermogensdichtheid van de laser is, dat er hoge snijsnelheden kunnen worden bereikt. Daarnaast kan een kleine snedebreëte (orde grootte 0,2 mm) worden gerealiseerd met een geringe warmte beïnvloede zone (circa 0,5 mm).

Geringe bundeldivergentie

Vaak wordt gedacht dat een nog niet gefocussede laserbundel perfect evenwijdig is. Dit is echter niet het geval. Dat wil zeggen, de diameter d [m] van de laserbundel varieert langs de optische as (zie figuur 2.2).



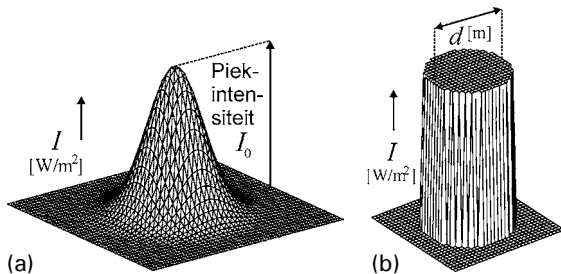
figuur 2.2 Verloop van de bundeldiameter d langs de z -as (optische as), voor een laserbundel met een gaussische energieverdeling (zie ook figuur 2.3)

De kleinste insnoering van de bundel d_0 [m], wordt *waist* (taille) genoemd. Vanaf de waist neemt de bundeldiameter toe. De divergentiehoek $\theta(z)$ [rad] bereikt op grote afstand van de waist de asymptotische waarde θ_0 [rad]. De divergentiehoek hangt af van de golflengte λ [m] van het laserlicht en de waist-diameter d_0 (zie figuur 2.2 en tabel 2.1). In vergelijking met 'normale' lichtbronnen is de divergentie van een laserbron klein. Dit maakt het mogelijk om de laserenergie over grote afstanden te transporteren, zonder dat de vermogensdichtheid I [W/m²]

afneemt. Tevens maakt dit het mogelijk om de bundel tot een kleine spot te focuseren, die nodig is voor een kleine snedebreedte.

Energieverdeling

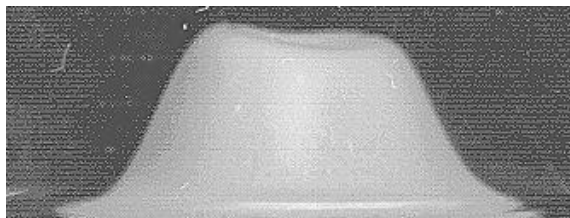
De energieverdeling (intensiteitsverdeling) van de laserstraling over de doorsnede van de bundel, wordt bepaald door de constructie van de resonator en de gebruikte optische componenten om de laserbundel te transporteren en te focuseren (zie ook § 2.3 en figuur 2.10). Figuur 2.3 toont een tweetal veel voorkomende energieverdelingen van lasers die worden ingezet voor het lasersnijden.



figuur 2.3 Twee voorkomende energieverdelingen (intensiteitsverdelingen) van laserbundels, voor het lasersnijden. a): Gaussisch $I_0 = 8P/(\pi \cdot d^2)$; b): Top hat $I = 4P/(\pi \cdot d^2)$

De gaussische intensiteitsverdeling (figuur 2.3a) komt veel voor bij CO₂-lasers. De maximale intensiteit (piekintensiteit) van deze energieverdeling treedt op in het centrum van de laserbundel. Diens diameter d [m] is gedefinieerd als die diameter waarbinnen 86% van het totale vermogen valt. De *top hat* (hoge hoed) intensiteitsverdeling (zie figuur 2.3b) ontstaat als het licht van een Nd:YAG-laser door een glasfiber wordt getransporteerd (zie ook figuur 2.9).

De intensiteitsverdeling van een CO₂-laserbundel kan zichtbaar worden gemaakt door gedurende korte tijd (circa 0,1 s) en met een laag vermogen (circa 100 W) de laserbundel te laten 'inbranden' op perspex. Figuur 2.4 toont een voorbeeld van een dergelijke *mode burn*.



figuur 2.4 Een 'inbranding' van een CO₂-laser in perspex maakt diens energieverdeling zichtbaar

Met deze methode kan op een goedkope en snelle wijze de diameter en de vorm van de intensiteitsverdeling worden gemeten. Deze diameter en vorm hebben een grote invloed op de snedekwaliteit (hoofdstuk 10). De methode is echter niet geschikt voor detail analyse. Daarvoor is het beter om een zogenaamd bundelanalyse apparaat te gebruiken [1].

Bundelkwaliteit

Een laserbundel (en dus ook de laserbron) kan worden gekarakteriseerd met het kwaliteitsgetal M^2 :

$$M^2 = \frac{\pi}{4\lambda} d_0 \cdot \theta_0 \quad (2.2)$$

Hierin d_0 de kleinste insnoering van de bundel en θ_0 de asymptotische waarde van de divergentiehoek (zie figuur 2.2). Voor de gaussische intensiteitsverdeling

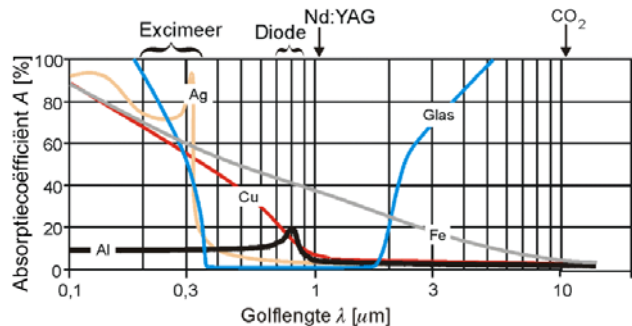
(zie figuur 2.3a) is $M^2 = 1$, voor alle andere energieverdelingen is $M^2 > 1$. Een bundelkwaliteit van ongeveer 1 is gunstig voor het lasersnijden, omdat in dat geval:

- ▶ de laserbundel tot een (zeer) kleine spot kan worden gefocuseerd (zie ook formule 2.3). Dit heeft als voordeel dat er op een hoge snelheid gesneden kan worden, of met een laag laser vermogen. Daarnaast resulteert een kleine laserspot in een kleine snedebreedte;
- ▶ de warmte-inbreng laag is (minder thermische vervormingen van het product);
- ▶ (focuseer)optiek (lenzen, spiegels) met kleine diameter kan worden ingezet;
- ▶ de werkafstand tussen focusseerlens/spiegel en het product groot is (zie ook figuur 2.11), wat gunstig is voor de bereikbaarheid van het product en veilig voor de optiek i.v.m. spatten.

Let op: Sommige leveranciers van laserbronnen specificeren i.p.v. het kwaliteitsgetal M^2 , diens reciproque $1/M^2$, of enkel het *bundelproduct*: $d_0 \cdot \theta_0$.

Absorptie van laserstraling

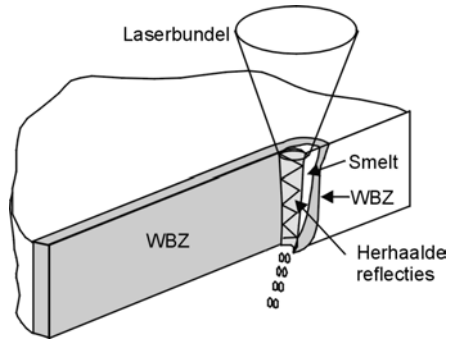
Bij het gebruik van lasers voor het snijden gaat het erom zo veel mogelijk laserenergie in het materiaal te krijgen, waar het wordt omgezet in warmte. Voor metalen vindt deze omzetting plaats in een dunne laag (circa 300 nm dik) aan het oppervlak. Niet alle laserenergie die op het oppervlak valt wordt geabsorbeerd. Het percentage van de op het oppervlak vallende energie dat wordt geabsorbeerd wordt absorptiecoëfficiënt A [%] genoemd. De rest van de energie wordt gereflecteerd. De absorptiecoëfficiënt van een materiaal hangt onder andere af van de optische eigenschappen van het materiaal (zie figuur 2.5).



figuur 2.5 Absorptiecoëfficiënt A [%] als functie van de golflengte van laserstraling van aluminium (Al), goud (Ag), koper (Cu), glas en ijzer (Fe)

Hoe hoger de absorptiecoëfficiënt voor een metaal/golflengte combinatie, des te beter het materiaal bewerkt kan worden. Voor metalen neemt de absorptiecoëfficiënt af met toenemende golflengte van het laserlicht. Zo is voor ijzer de absorptiecoëfficiënt van CO₂-laserstraling minder dan 20% en van Nd:YAG-laserstraling bijna 40%. Behalve absorptie aan het oppervlak treedt er echter ook absorptie op aan de wanden van de snede. Dankzij herhaalde reflecties (en dus herhaalde absorptie) van de laserbundel in de snede kan de totale absorptie hierdoor oplopen tot wel 80% (zie figuur 2.6). Door de herhaalde reflecties kan de laserbundel diep het materiaal indringen.

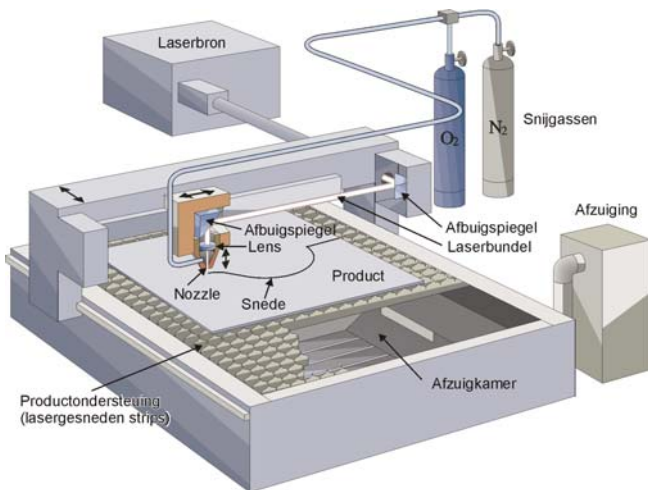
Nadat de laserenergie is getransformeerd in warmte in de wanden van de snede, vloeit de warmte door geleiding naar het omliggende materiaal. De temperatuur zal hierdoor lokaal stijgen tot boven de smelttemperatuur en bij sublimatiesnijden (zie hoofdstuk 3) tot boven de verdampingstemperatuur.



figuur 2.6 Hoge absorptie door meerdere reflecties (en dus herhaalde absorptie) van het laserlicht op de wanden van de snede. (WBZ = warmte beïnvloede zone)

2.3 Machine-aspecten

Behalve de eigenschappen van de laserbron en de laserstraling bepalen ook de andere componenten van de lasersnij-installatie (zie voorbeeld in figuur 2.7) het resultaat van het lasersnijden.



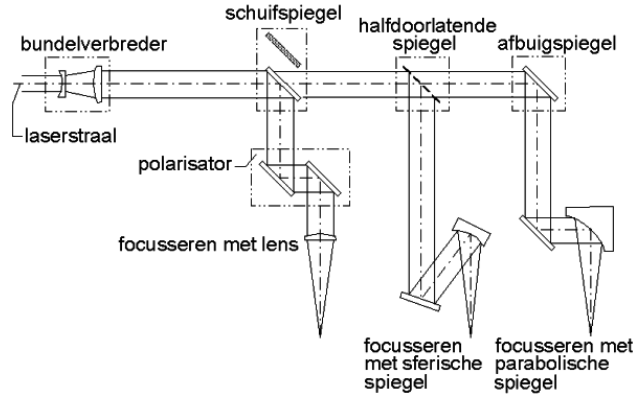
figuur 2.7 Componenten van een lasersnij-installatie op basis van een gantry (CNC) machine. Een lasersnij-installatie op basis van een 6-assige industriële robot bestaat uit vergelijkbare onderdelen

Bundeltransport d.m.v. spiegels en glasfibers

Nadat de laserbundel is uitgetreden uit de laserbron moet deze worden getransporteerd naar de focuseringsoptiek die zich op de bewerkingsplaats bevindt.

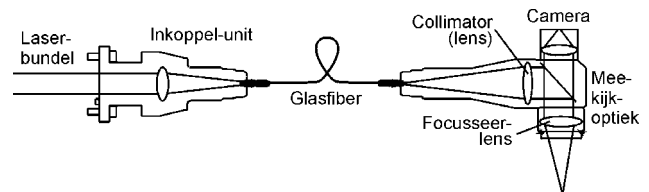
Bij de CO₂-laser wordt het laserlicht via (afbuig)spiegels van de laserbron naar de bewerkingsplaats getransporteerd (zie figuur 2.8).

Met een schuifspiegel of een gedeeltelijk doorlatende spiegel kan de laserbundel naar afzonderlijke bewerkingsplaatsen worden geleid, zodat één laserbundel op verschillende werkstations kan worden ingezet. Spiegels voor CO₂-lasers zijn meestal van koper gemaakt en voorzien van waterkoeling. Per spiegel moet rekening worden gehouden met een vermogensverlies van 0,5 tot 4%. Als de bundel over grote afstanden (meerdere meters) wordt getransporteerd (bijvoorbeeld voor het snijden van grote platen), zal ten gevolge van de bundeldivergentie de bundeldiameter sterk toenemen. Dit probleem wordt opgelost door de toepassing van een bundelverbreder (of telescoop), zie figuur 2.8.



figuur 2.8 Bundeltransport (en focusering) van laserstraling door middel van spiegels. Het bundelgeleidingssysteem is meestal geheel afgesloten van de omgeving (buizen). Dit voorkomt dat de bundel uit kan treden. Daarnaast voorkomt de afscherming dat gassen en vuildeeltjes het bundelpad kruisen

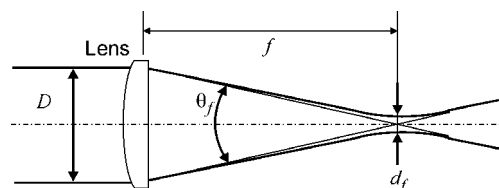
De straling van een Nd:YAG-laser kan, behalve met spiegels, ook door glasfibers (kerndiameter van 0,3 tot 1 mm) worden getransporteerd (zie figuur 2.9). Het laserlicht blijft door interne reflecties 'gevangen' in de fiber. Hoe kleiner de kerndiameter van de fiber, des te kleiner de diameter van het focus en des te hoger de snijsnelheid. Echter hoe kleiner de kerndiameter des te meer vermogen verloren gaat bij het inkoppelen van het laserlicht in de fiber. De energieverdeling van de uit de fiber uitgetreden laserbundel heeft een *top hat* intensiteitsverdeling (zie figuur 2.3b).



figuur 2.9 De straling van Nd:YAG kan door een glasfiber worden getransporteerd van laserbron naar focusseerkop

Focusering

Om de vereiste hoge vermogensdichtheid te verkrijgen, die nodig is om metaal te smelten, wordt de laserbundel met behulp van lenzen of spiegels gefocuseerd (zie figuren 2.1, 2.8 en 2.10). Lenzen voor CO₂-lasers zijn bijna altijd van zink-selenide (ZnSe) gemaakt. Deze lenzen kennen een vermogensverlies van circa 1% per lens, dat toeneemt met de standtijd (circa 3000 uur) van de lens. ZnSe is niet bestand tegen zeer hoge laser vermogens. Mits gekoeld, kunnen deze lenzen bij een laser vermogen tot maximaal 5 kW worden gebruikt. Daarom worden bij hoge vermogens spiegels ingezet (zie figuur 2.8). Per spiegel moet men rekenen op 0,5 tot 4% vermogensverlies.



figuur 2.10 Focusering van de laserbundel m.b.v. een lens. Voor de eenvoud is de ongefocuseerde laserbundel weergegeven als een parallelle bundel zonder divergentie

Voor Nd:YAG-lasers maakt men gebruik van een samenstelling van meerdere kwartslenzen, waarvoor men moet rekenen op 1% vermogensverlies per lens.

Focusdiameter

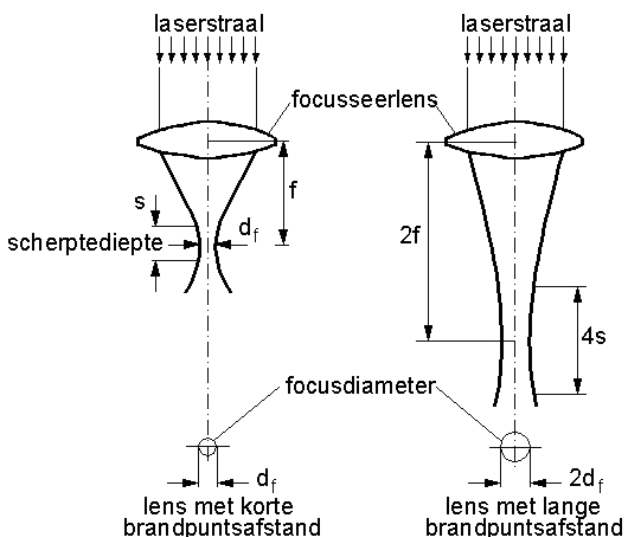
Bij aberratievrije (foutvrije) lenzen wordt de diameter d_f [m] van het focus bepaald door de brandpuntsafstand f [m] van de focusseerlens (of spiegel), de golflengte λ [m] van het laserlicht, het kwaliteitsgetal M^2 en de diameter D [m] van de laserbundel vóór focussering en bedraagt:

$$d_f = \frac{4M^2 \lambda \cdot f}{\pi D} \text{ [m]} \quad (2.3)$$

De typische diameter van de laserspot voor het lasersnijden bedraagt circa 0,1 tot 0,2 mm. Hoe kleiner de focusdiameter des te hoger de intensiteit (vermogensdichtheid, zie formule 2.1), en des te hoger de snijsnelheid en des te smaller de snedebreedte. Een kleine focusdiameter kan worden verkregen met een kwalitatief goede laserbron (kleine M^2 , dus $M^2 \approx 1$) en/of een sterke lens (kleine brandpuntsafstand f). Echter een kleine brandpuntsafstand betekent ook een kleine werkafstand tussen focusseerlens/spiegel en het product (zie figuur 2.11). Met een veilige werkafstand van circa 5 tot 20 cm moet worden gerekend. De optiek wordt beschermt tegen spatten vanaf het product tijdens het snijden door de coaxiale gasstroom (zie figuur 1.1).

Scherptediepte

De scherptediepte s is gedefinieerd als twee maal die afstand tot het focus waarover de bundeldiameter met een factor $\sqrt{2}$ groter is dan de diameter d_f van het focus (zie figuur 2.11). Dus op de afstand $s/2$ van het focus is de energiedichtheid nog maar de helft van die in het focus. Een grote scherptediepte is gewenst omdat dit resulteert in een rechte (haaksere) snede. Bovendien zal rondom het focus, de bundeldiameter relatief weinig toenemen en dus de intensiteit weinig afnemen. Dit betekent dat de positionering van het te snijden product t.o.v. het focus minder kritisch is (zie § 4.2). Een grote scherptediepte kan worden bereikt door te focuseren met een optiek met lange brandpuntsafstand. Echter, met toenemende brandpuntsafstand neemt ook de diameter van het focus toe (zie figuur 2.11 en formule 2.3).

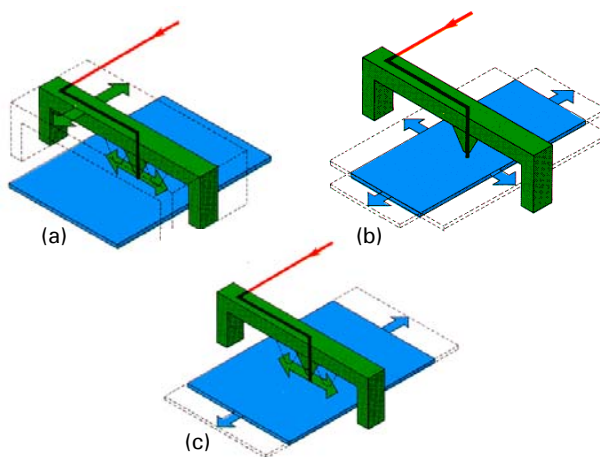


figuur 2.11 Invloed van de brandpuntsafstand op de scherptediepte

Optiek- en/of werkstukmanipulatie

Lasersnijden kan plaatsvinden op relatief hoge snelheden (tot meer dan 15 m/min). Samen met de nauwkeurigheid van de bewerking (in de orde van 50 μm tot 200 μm) stelt dit hoge eisen aan de manipulators. Om

de laserspot over het materiaal te bewegen kan men gebruikmaken van een productmanipulator met stilstaande optiek, van een stilstaand product met flying optics of een hybride variant (zie figuur 2.12).

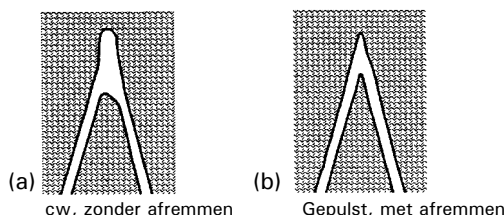


figuur 2.12 Optiek versus werkstukmanipulatie
 (a) Flying optics, waarin de optiek (laserbundel) wordt bewogen en het product stil staat. Deze opstelling wordt meestal toegepast voor het snijden van grote of zware producten
 (b) Stilstaande optiek en bewegend product. Deze opstelling wordt meestal toegepast voor het snijden van lichte/kleine producten
 (c) Hybride manipulator, waarin zowel de optiek, als het product wordt bewogen

Afhankelijk van de dimensies van het product kiest men voor een 1D systeem, bijvoorbeeld voor het snijden van buizen, voor een 2D of een 2½D systeem voor het snijden van plaatmateriaal of een 3D systeem voor het bewerken van drie-dimensionale producten. Naarmate het systeem van meer assen is voorzien, zal het minder nauwkeurig en duurder zijn. Voor het snijden van 3D producten kan men behalve de relatief nauwkeurige *CNC- en gantry*-manipulators ook een robot inzetten. Samen met een laserbron voorzien van een glasfiber, vormt een robot een zeer flexibel productiemiddel.

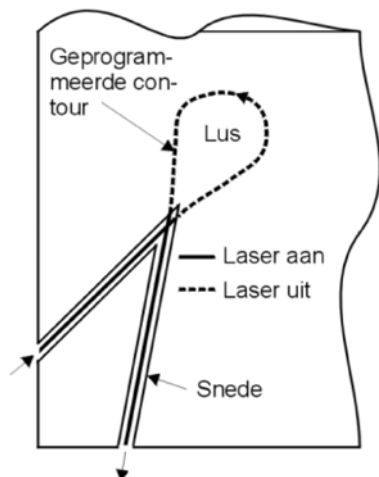
Contournsnijden & off line programmeren

Voor een constante snedekwaliteit dient de laserspot met constante snelheid over het product bewogen te worden. Afwijkingen in de versnelling en vertraging van de verschillende assen van de manipulator leiden tot afwijkingen t.o.v. de snijcontour, maar ook tot snelheidsvariaties. Dit laatste leidt tot overmatige warmte-inbreng (zie figuur 2.13a). Dit probleem treedt met name op bij scherpe contouren. De positionnauwkeurigheid van de manipulator (en dus ook die van de snede) kan worden vergroot door, ter plaatse van scherpe contouren, de snijsnelheid te verlagen. Door gelijktijdig het laser vermogen te verlagen (of beter nog, over te gaan op gepulst snijden), kan men een constante snedekwaliteit verkrijgen (zie figuur 2.13b).



figuur 2.13 Effect van snelheidsvariaties (t.g.v. de manipulator) op de snedekwaliteit (a). Beter snijresultaten (b) kunnen worden bereikt door het cw-laservermogen te reduceren of te pulseren, bij gelijktijdige vermindering van de snijsnelheid

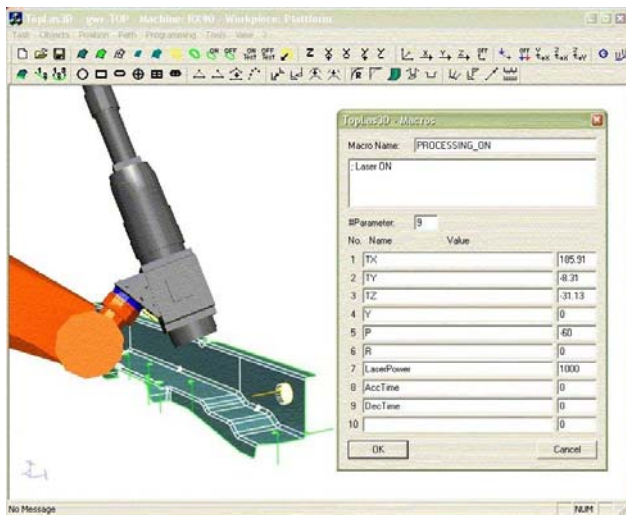
Een andere oplossing voor dit soort positioneringsproblemen is het programmeren van een ijlgang in de vorm van een lus (zie figuur 2.14).



figuur 2.14 Introductie van een lus (ijlgang) in de snijcontour ter vergroting van de snij nauwkeurigheid en vermindering van overmatige warmte-inbreng. Deze lus wordt soms een 'ezelsoor' genoemd (zie § 7.1)

Voor producten waarin vele kleine contouren vlak bij elkaar gesneden moeten worden, kan ook overmatige warmte-inbreng optreden. Om dit te minimaliseren, dient de volgorde van de afzonderlijke snijcontouren zo te worden geprogrammeerd, dat er voldoende tijd voor afkoeling is tussen de opeenvolgende snijprocessen.

Er zijn verschillende off line programmeersoftwarepakketten op de markt die bovenstaande oplossingen voor de snijcontour (incl. de instellingen van de laserbron) automatisch uitvoeren op basis van een CAD bestand van het product (zie figuur 2.15). Deze softwarepakketten zijn ook in staat om de snijcontour te voorzien van inloopcontouren en startgaten (zie § 4.4), en de ijlgangen (en dus de productietijd) te optimaliseren.



figuur 2.15 Een off line programmeer software-pakket voor het lasersnijden met een robot

3 Snijprincipes

Men maakt onderscheid tussen drie snijprincipes:

- ▶ het sublimatiesnijden,
- ▶ het smelten en uitdrijven met een niet-reactief gas (ook wel laser-smeltsnijden genoemd), en
- ▶ het smelten en uitdrijven met een reactief gas (ook wel laser-brandsnijden genoemd).

Vanwege de hoge snijsnelheid en de oxidevrije snedekant, wordt het meest gebruikgemaakt van de methode van het smelten en uitdrijven van het materiaal.

Sublimatiesnijden

Tijdens het sublimatiesnijden gaat het materiaal in de snede onder invloed van de laserenergie direct van de vaste fase over in de dampfase, waarna het door de gasstraal uit de snede wordt gedreven. Meestal wordt stikstof gebruikt om oxidatie van de snede te voorkomen (zie § 4.3). Voor het sublimatiesnijden van metalen wordt meestal een gepulste Nd:YAG-laser toegepast (piekvermogens meer dan 2 kW, pulstijden minder dan 1 ms). Een voordeel van sublimatiesnijden is de zeer goede kwaliteit van de snijkant, dat wil zeggen: nauwelijks *striations* (figuur 1.2) en dus een lage ruwheid. Daarnaast is de warmte beïnvloede zone zeer klein ($<0,5$ mm). Nadelen zijn de hoge benodigde energiedichtheid en een lage snijsnelheid in vergelijking met het smeltsnijden. Daarom wordt sublimatiesnijden voornamelijk toegepast als de eisen aan de snijkant erg hoog zijn, of voor het snijden van niet-metalen, zoals hout, papier, keramiek, en kunststoffen. Daartoe worden voornamelijk CO₂-lasers ingezet.

Smelten en uitdrijven met een niet-reactief gas

Het smelten en uitdrijven met een niet-reactief gas, wordt ook wel *laser-smeltsnijden* genoemd. Meestal wordt stikstof gebruikt om het gesmolten metaal uit de snede te blazen. Door het gebruik van niet-reactief gas blijft de snede oxidevrij en bij hoge gassnelheden, braamvrij. Voor staal ligt de benodigde energiedichtheid bij dit proces tussen 10^8 W/m² en 10^9 W/m². De snijsnelheid is afhankelijk van het materiaal, de materiaaldikte en het beschikbare laservermogen (zie § 4.1). In vergelijking met sublimatiesnijden is smeltsnijden sneller, maar zijn de ruwheid van de snedekant en de warmte beïnvloede zone groter.

Smelten en uitdrijven met een reactief gas

Het smelten en uitdrijven met een reactief gas, wordt ook wel *laser-brandsnijden* genoemd, en lijkt sterk op autogeen brandsnijden. Het materiaal wordt door de laser tot boven de verbrandingstemperatuur verhit, waarna er een exotherme reactie met zuurstof optreedt (verbranding). De hierbij vrijkomende energie kan een veelvoud zijn van de door de laserbundel ingebrachte energie. Dit resulteert in snijsnelheden die een factor 2 à 3 hoger liggen dan bij het snijden met een niet-reactief gas. De metaaldampen en sommige van de oxidatieproducten, worden meegevoerd met de gasstroom. Een deel van de oxidatieproducten zet zich echter vast op de snijkant.

4 Parameterinvloeden

In deze paragraaf worden de belangrijkste parameters die het lasresultaat bepalen besproken.

4.1 Laservermogen en snijsnelheid

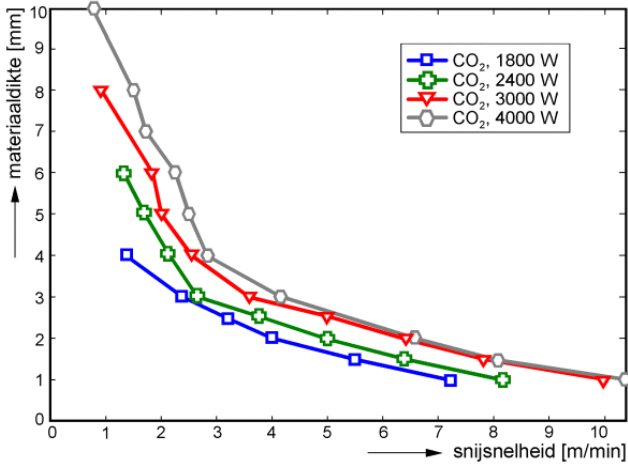
Het laservermogen (bij gegeven focusdiameter) en de snijsnelheid zijn de belangrijkste parameters die de resultaten van een lasersnede bepalen. Hierbij maakt men onderscheid naar cw-snijden (d.w.z. het laservermogen is constant tijdens het snijden) en het gepulseerd snijden.

In vergelijking met gepulseerd lasersnijden brengt hoogvermogen cw-snijden veel warmte in de snijkanten, met als gevolg een relatief brede warmte beïnvloede zone. Deze warmte beïnvloede zone (WBZ) is echter veel kleiner ($<0,5$ mm) dan de WBZ bij andere thermische scheidingsmethoden. Figuren 4.1 en 4.2 tonen representatieve snijsnelheden bij verschillende laservermogens, in het geval van snijden van RVS met stikstof (niet-reactief) en het laser-brandsnijden van staal (reactief).

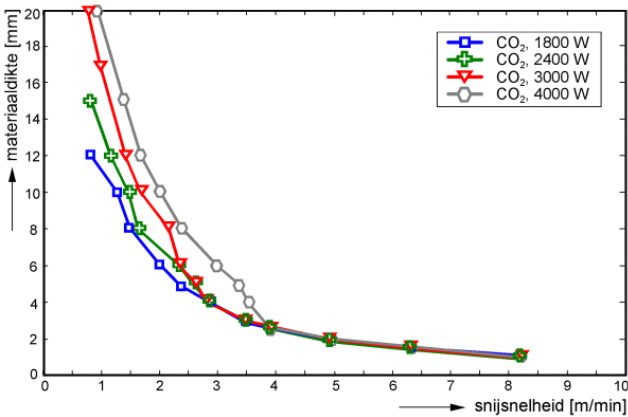
tief). Figuur 4.3 toont representatieve snijnelheden voor aluminium. In het algemeen kan de volgende relatie tussen snijnsnelheid v , laser vermogen P en materiaaldikte s , worden gehanteerd:

$$v = \frac{C \cdot P}{s}, \quad (4.1)$$

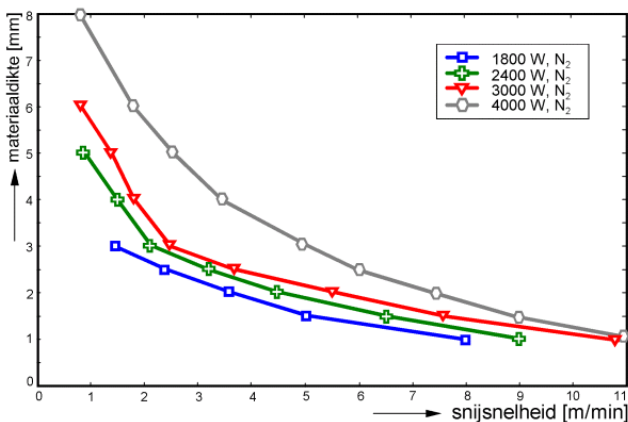
waarbij C een materiaalafhankelijke constante is. Dus naarmate de materiaaldikte s kleiner is en meer vermogen P beschikbaar is, zal de snijnsnelheid hoger kunnen zijn.



figuur 4.1 Representatieve snijnelheden, in het geval van het cw-lasersnijden van RVS met stikstof (niet-reactief)



figuur 4.2 Representatieve snijnelheden, in het geval van lasersnijden van staal met zuurstof (reactief)



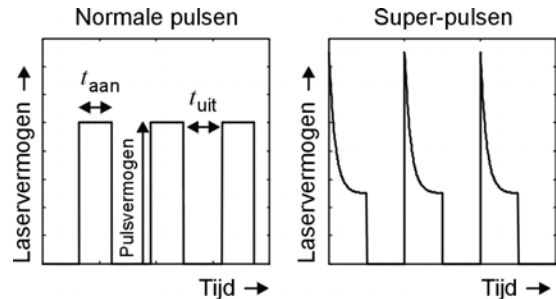
figuur 4.3 Representatieve snijnelheden, in het geval van lasersnijden van aluminium

Bij gepulste lasers maakt men onderscheid tussen gewone pulsen en super-pulsen (zie figuur 4.4).

Het gemiddelde laser vermogen P_{Gem} [W] is een percentage van het pulsvermogen.

$$P_{\text{Gem}} = \frac{t_{\text{aan}}}{t_{\text{aan}} + t_{\text{uit}}} \cdot \text{Pulsvermogen} \quad (4.2)$$

Bij super-pulsen wordt de laserbron zo aangestuurd dat er vermogenspieken ontstaan, die hoger zijn dan het maximale cw-vermogen dat de bron kan uitzenden.

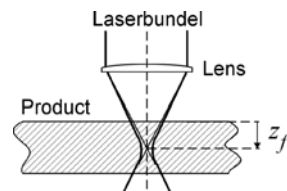


figuur 4.4 Verschillende pulsmodes

Tijdens de aan-tijd van de (super)puls wordt het materiaal gesmolten, verdampt en uitgedreven. Tijdens de uit-tijd krijgt het (bulk)materiaal de gelegenheid om af te koelen, terwijl de laserbundel beweegt. Hierdoor is de warmte beïnvloede zone en de thermische belasting van het product, kleiner dan bij cw-snijden. De snijnelheden zijn echter lager dan bij cw-snijden (zie figuren 4.1 en 4.2). Super-pulsen bieden voordelen bij het boren van een startgat (zie § 4.4) en het snijden van sterk reflecterende metalen door de hoge intensiteit die bij deze pulsen ontstaan.

4.2 Focuspositie

Voor het maken van een goede snede is een precieze positionering van de laserbundel van belang. Dit betreft de diameter en de ligging van het focus t.o.v. het productoppervlak (zie figuur 4.5).

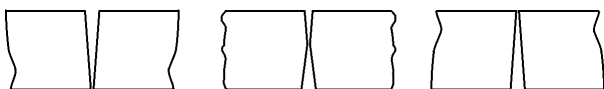


figuur 4.5 De focuspositie z_f is gedefinieerd als de afstand van de bovenzijde van het product tot aan het focus. Indien het focus onder het productoppervlak geïmponeerd wordt, is z_f positief ($z_f > 0$). Als het focus boven het productoppervlak wordt geïmponeerd is z_f negatief ($z_f < 0$)

Een onjuiste focuspositie kan leiden tot het ontstaan van ronde snijkanten, te grote snedebreedte, niet evenwijdig zijn van snijkanten (zie figuur 4.6), braamvorming en een te lage snijnsnelheid (zie hoofdstuk 10). De focuspositie is vooral kritisch bij het gebruik van lenzen met een korte brandpuntsafstand. Dit omdat deze lenzen gekenmerkt worden door een kleine scherptediepte (zie figuren 2.11 en 4.6).

De optimale focuspositie is die positie die de kleinste snedebreedte realiseert. Deze optimale positie hangt af van het materiaaltype en -dikte. Zo varieert de optimale focuspositie voor het snijden van staal met zuurstof tussen $z_f = 0$ en $z_f = -0,3 \cdot s$, waarbij s de materiaaldikte is. De optimale positie voor het snijden van metalen met stikstof is aan de onderzijde van het materiaal (dus

$z_f \approx$ materiaaldikte). De machineleverancier stelt meestal tabellen met de optimale focuspositie voor verschillende materiaal(diktes) beschikbaar. Een methode om zelf de optimale focuspositie voor een materiaal te bepalen is door experimenten uit te voeren waarbij de focuspositie wordt gevarieerd, maar waarbij de nozzle-plaat afstand (zie § 4.3) constant wordt gehouden. De optimale focuspositie is die positie die de kleinste snedebreëde realiseert.



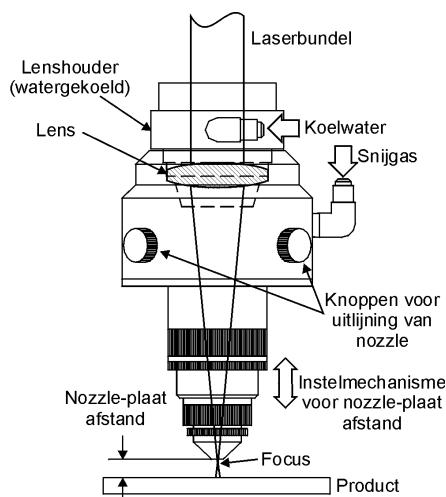
figuur 4.6 Invloed van de focuspositie op de tapsheid van de snede. De snede heeft de vorm van de convergerende c.q. divergerende laserbundel. Links: focuspositie op de onderzijde van de plaat, midden: focuspositie in het midden van de plaat, rechts: focuspositie op het productoppervlak. Naarmate de brandpuntsafstand van de gebruikte lens kleiner is zal dit effect groter zijn

4.3 Snijgassen

Lasersnijden vindt vrijwel altijd plaats met behulp van een snijgas, dat coaxiaal met de laserbundel in de snede wordt geblazen. De functie van het snijgas is:

- ▶ het uit de snede drijven van het door de laserbundel gesmolten en/of verdampte metaal;
- ▶ het opwekken van extra warmte bij het laser-brand-snijden (zie hoofdstuk 3) d.m.v. het reageren van zuurstof met het metaal (verbranden);
- ▶ bescherming van de (focuseer)optiek tegen spatten vanuit de snede;
- ▶ het koelen van het materiaal naast de snede. Dit is met name van belang bij het snijden van smalle en scherpe contouren, waarbij overmatige warmte-inbreng een probleem kan vormen.

Figuur 4.7 toont de verschillende componenten van een snijkop.



figuur 4.7 De verschillende componenten van een snijkop

Gastype

De keuze voor een bepaald type snijgas hangt samen met het te snijden materiaal. Bij staal geeft zuurstof de beste resultaten. Bij roestvast staal wordt in het algemeen stikstof als snijgas gebruikt. Nadeel is, dat de snijnsnelheid in vergelijking met zuurstof aanzienlijk lager ligt. Deze snelheidsreductie kan echter worden beperkt door gebruik te maken van een hogere gasdruk (ongeveer 1,5 MPa). Tabel 4.1 geeft een overzicht van de meest toegepaste snijgassen bij verschillende metalen.

tabel 4.1 Snijgassen toegepast voor lasersnijden

materiaal		snijgas	
		Zuurstof (O ₂) zuiverheid 99,95%	Stikstof (N ₂) zuiverheid 99,998%
Staal	ongelegeerd	●	●
	laaggelegeerd	●	●
	hooggelegeerd		●
	RVS		●
	verzinkt	●	●
	geverfd		●
Ni- en Co-basislegeringen			●
Aluminium en Al-legeringen			●
Titaan en titaanlegeringen			argon/helium
Koper en koperlegeringen		●	

In de praktijk wordt voor het snijden doorgaans stikstof uit een tank genomen, waarin het vloeibaar opgeslagen is. De zuiverheid is dan 5.0 (voor een uitleg over de zuiverheid, zie grijs kader).

Notatie zuiverheden gassen
 Behalve percentages is het gebruikelijk de zuiverheid van een gas met een cijfer aan te geven. Een dergelijk cijfer is opgebouwd uit een getal vóór en een getal ná de punt, bijvoorbeeld 3.5. Het cijfer voor de punt (in dit voorbeeld 3) geeft het aantal negens aan van de percentuele zuiverheid (dus 3 negens). Het getal achter de punt (5 in dit voorbeeld) geeft het laatste cijfer aan in de percentuele zuiverheid. Dus 3.5 betekent een zuiverheid van 99,95%. De zuiverheid 99,998% van de in tabel 4.1 aangegeven stikstof is dus in deze notatie 4.8.

In tegenstelling tot het snijden van staal, hebben de reactieproducten (oxides) bij het snijden van RVS en aluminium, de neiging zich aan de onderkant van de snede te hechten (braam). Deze laten zich moeilijk verwijderen. Echter, bij een goede uitvoering van het snijproces is braamvrij snijden mogelijk. Oxidatie van de snijkant treedt in alle gevallen op (die zich bij staal gemakkelijk middels borstelen laat verwijderen). In vergelijking met smeltsnijden zijn de warmte beïnvloede zone en de ruwheid (striations) groter. Omdat titaan(legeringen) reageren met zuurstof en stikstof tot (zeer) harde oxides en nitriden, worden deze metalen gesneden met argon of helium (of een mix van beide gassen). Argon en helium zijn duurder dan stikstof.

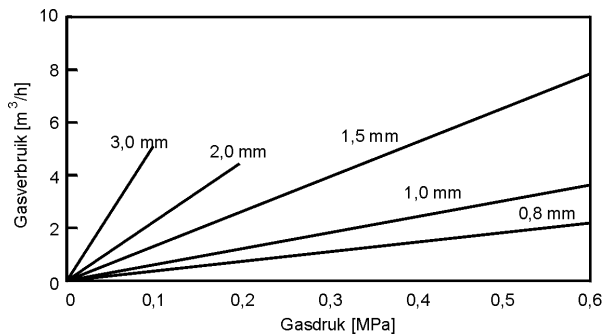
Gasdruk en -verbruik

De optimale gasdruk is afhankelijk van het materiaal, de dikte van het materiaal, het gastype en de diameter (en vorm) van de nozzle-opening. De gasdrukken bij het laser-brand-snijden met zuurstof varieert van 0,02 tot 0,6 MPa (0,2 tot 6 bar). Bij grotere materiaaldiktes (en lagere snijnsnelheden) wordt de gasdruk verlaagd. De hogere gasdruk bij dunne producten is nodig om voldoende zuurstof toe te voeren i.v.m. de hogere snijnsnelheid bij dunne materialen.

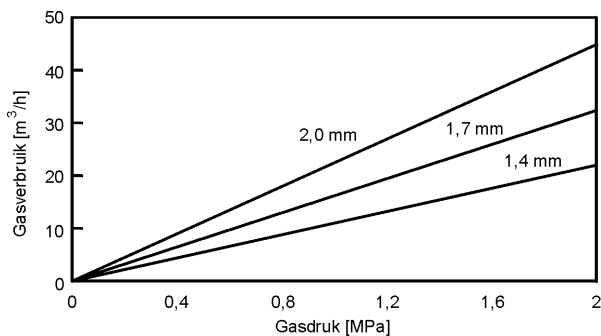
Bij het snijden met een niet-reactief gas (argon, stikstof, helium) zijn hogere drukken nodig om het gesmolten metaal uit de snede te drijven.

Voor het snijden van metalen tot circa 6 mm worden gasdrukken van 0,8 tot 1 MPa (8 tot 10 bar) gebruikt. Voor dikkere materialen zijn gasdrukken van circa 1,5 tot 2,7 MPa (15 tot 27 bar) nodig. Men dient er op toe te zien dat de optiek deze hoge drukken kan weerstaan.

Het gasverbruik hangt af van de gasdruk en de diameter van de nozzle-opening en kan aanzienlijk zijn (zie figuur 4.8)



(a) Zuurstof



(b) Stikstof

figuur 4.8 Maximaal gasverbruik bij cw-snijden als functie van de gasdruk voor verschillende diameters van de nozzle-opening

Gasnozzle

De geometrie van de nozzle-uitstroomopening, de afstand tussen het uiteinde van de nozzle en het oppervlak van het product (de zogenaamde *nozzle-plaat afstand*, zie figuur 4.7) alsmede de gasdruk hebben grote invloed op de snijsnelheid en de snedekwaliteit.

De voornaamste oorzaak hiervan is, dat de snedebreedte veel kleiner is dan de diameter van de nozzle-opening, waardoor slechts een deel van de gasstroom in de snede stroomt. Rechte en conische nozzleboringen worden, vanwege de maakbaarheid, het meest toegepast. Bij gasdrukken hoger dan 0,6 MPa (6 bar) worden speciale nozzles gebruikt, zoals *deLaval* nozzles en nozzles met ster- of lobvormige openingen.

De diameter van de nozzle-opening (in de orde grootte van 1 tot 2,2 mm) is circa twee maal zo groot als de breedte van de snede. Hierdoor is er nauwelijks drukverlies tussen de nozzle-opening en het productoppervlak. Echter, in de snede zal na een afstand van enkele malen de diameter van de nozzle-opening, de gasstroom sterk in volume toenemen, waardoor de snedebreedte sterk toeneemt. Dit beperkt de dikte van het materiaal dat gesneden kan worden.

Een kleine nozzle-opening heeft een laag gasverbruik als voordeel, maar heeft als nadeel dat de uitlijning met de laserbundel kritisch is. Bovendien is een kleine nozzle gevoeliger voor variaties in de gasdruk.

Uitlijning gasnozzle

Onderzoek heeft aangetoond dat, wanneer de hartlijn van de nozzle circa 0,5 mm achterloopt op de laserbundel, er met een lagere gasdruk (en dus lager gasverbruik), gesneden kan worden [2]. Vanwege de lagere gasdruk resulteert dit in een betere snedekwaliteit. Om dit voordeel uit te buiten is een servo-gestuurde nozzle vereist, indien niet-rechte sneden moeten worden gemaakt. Als er geen servo-gestuurde nozzle ter beschikking staat, dient de nozzle-opening en de laserbundel

coaxiaal uitgelijnd zijn (afwijking mag maximaal circa 0,2 mm zijn). Vrijwel elke snijkop is voorzien van een instelmechanisme voor het centreren van de nozzle (zie figuur 4.7). Fouten in de nozzle-uitlijning kunnen resulteren in een tapse snede en/of braam aan slechts één zijde van de snede. Een praktische methode om de uitlijning te controleren is, door een stukje tape op de nozzle-opening te plakken en de laser één puls te laten afgeven. Een eventuele excentriciteit van de nozzle t.o.v. de laserbundel is dan zichtbaar aan de locatie van het gaatje in de tape.

Nozzle-plaat afstand

De nozzle-plaat afstand (figuur 4.7) heeft grote invloed op de snijsnelheid en de snedekwaliteit. De optimale nozzle-plaat afstand varieert tussen circa 0,5 en 2,5 mm (circa 0,2 tot 0,8 maal de diameter van de nozzle-opening). Afstanden groter dan de nozzle-opening resulteren in turbulente stromingen (wervelingen) van het snijgas; een ongewenst effect. Dit in combinatie met een smalle snedebreedte resulteert in grote drukfluctuaties, wat weer resulteert in variërende snedekwaliteit. Omdat de nozzle-plaatafstand een kritische parameter is, dient deze constant te worden gehouden tijdens het snijden. Daartoe kan men een hoogtesensor en een regelsysteem inzetten (zie § 6.2).

4.4 Startgat

Om een snede te starten kan zowel op de snijcontour als ernaast gestart worden. Daartoe boort men met de laser een startgat waarbij de laserbundel en het product ten opzichte van elkaar niet bewegen.

Daarbij maakt men onderscheid naar twee boormethoden:

- ▶ boren van het start gat met cw-laservermogen;
- ▶ gepulseerd boren van het startgat.

Bij het boren met cw-laservermogen wordt het startgat gecreëerd met een relatief hoog continue laservermogen, een gasdruk van circa 0,4 MPa (4 bar) en meestal een toenemende nozzle-plaat afstand tijdens het boren. Deze methode voor het creëren van een startgat is twee tot drie maal zo snel als gepulseerd boren, maar kent een aantal nadelen. Het vormt een relatief zware thermische belasting voor het product. De diameter van het startgat is veel groter dan de snedebreedte, waardoor het niet mogelijk is om op de snijcontour te starten. En het boren gaat gepaard met veel spatten, resulterend in vervuiling van de nozzle-opening.

Tijdens het gepulseerd boren (figuur 4.4) wordt het startgat met een niet-reactief gas onder lage druk (minder dan 0,1 MPa, 1 bar) geboord. Na het pulsen laat men meestal het cw-laservermogen lineair toenemen (tijdens het versnellen van het product) tot een continue waarde waarmee gesneden wordt. Deze gecontroleerde wijze van boren resulteert in een startgat waarvan de diameter niet groter is dan de gewenste snedebreedte. Dit maakt het mogelijk om op de snijcontour te starten. Zuurstof versnelt het gepulseerd gatsteken nauwelijks.

Omdat voor het gatsteken een andere gasdruk nodig is dan voor het snijden, is een servo-gestuurde gasklep/reduceerventiel nodig.

4.5 Materiaaleigenschappen

Vele materialen zijn te snijden met behulp van een laser zoals staal, aluminium, kunststof, papier en hout. Toch is er een groot verschil tussen de mate van snijbaarheid tussen materialen. Staal bijvoorbeeld is veel gemakkelijker te snijden dan aluminium.

Materiaaleigenschappen die grote invloed hebben op de lasersnijbaarheid zijn:

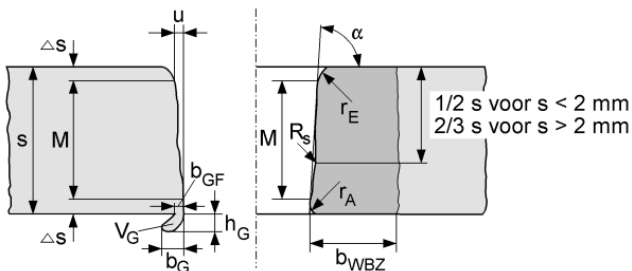
- ▶ de toestand van het productoppervlak en de absorptiecoëfficiënt A [%] (figuur 2.5). Hoe hoger hoe beter;

- ▶ De warmtegeleidingseigenschappen van het materiaal, gekarakteriseerd door de warmtegeleidingscoëfficiënt K [W/(m·K)] en de warmtediffusiecoëfficiënt κ [m²/s]. Hoe lager hoe beter;
- ▶ Smelttemperatuur T_m [°C] en smeltwarmte H_m [J/kg]. Hoe lager hoe beter;
- ▶ Verdampingstemperatuur T_v [°C] en verdampingswarmte H_v [J/kg]. Hoe lager hoe beter;
- ▶ Viscositeit η [N·s/m²] van het vloeibare materiaal. Een hoge viscositeit betekent een stroperige vloeistof en zal makkelijk leiden tot braamvorming.

De machineleverancier stelt meestal tabellen met de optimale machine-instellingen (§ 4.1 t/m 4.4) voor verschillende materialen beschikbaar.

5 Karakterisering van de snedekwaliteit

De snedekwaliteit kan door verschillende grootheden worden gekarakteriseerd. De Duitse VDI *Richtlinie* 2906 Blatt 8 [3] en DIN 2310 norm [4] leggen o.a. de haaksheid, de ruwheid en de braam vast (zie figuur 5.1).

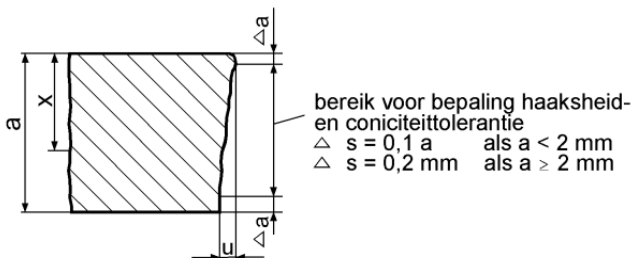


figuur 5.1 Definitie van de snedekwaliteit volgens de VDI *Richtlinie* 2906 Blatt 8 [3]

Hierin is:

- r_E afronding bundelintreezijde [m]
- r_A afronding bundeluitreezijde [m]
- α coniciteit van de snede [rad]
- u haaksheidstolerantie [m]
- R_s ruwheid van de snede (gebruikelijk is R_z)
- V_G, b_G, h_G braamvolume [m³], -breedte [m] en -hoogte [m]
- b_{GF} grootste braambreedte [m]
- b_{WBZ} warmte beïnvloede zone [m]
- s plaatdikte [m]
- M meetbereik voor de bepaling van u en b_{WBZ} , waarin $\Delta s = 0,1s$ voor $s < 2$ mm en $\Delta s = 0,2s$ voor $s \geq 2$ mm

Deel 1 en 5 van de DIN 2310 norm kent drie kwaliteitsklassen van de snede (Feld 1 hoogste kwaliteit, Feld 3 laagste kwaliteit), die wordt ingedeeld op basis van haaksheid en ruwheid (zie figuur 5.2 en tabel 5.1).



figuur 5.2 Kwalificatie van lasergesneden producten op basis van de snedekwaliteit, i.h.b. haaksheid en ruwheid (R_z) volgens deel 1 en 5 van de norm DIN 2310

tabel 5.1 Classificatie van lasersnede volgens DIN 2310

kwaliteit	Feld 1	Feld 2	Feld 3
voorwaarden	$u < 0,05 + 0,0025s$ en $R_z < 10 + 2s$	$u < 0,1 + 0,015s$ en $R_z < 30 + 3s$	$u < 0,25 + 0,025s$ en $R_z < 60 + 4s$
u = haaksheid- en coniciteitstolerantie [mm]; R_z = ruwheid [μ m]; s = materiaaldikte [mm]			

6 Overige componenten van een lasersnij-installatie

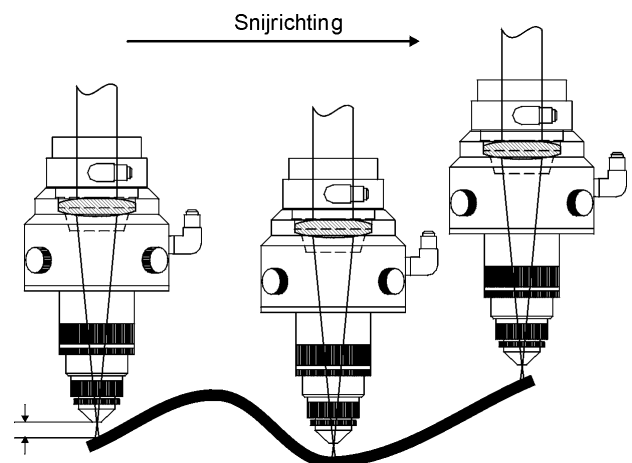
6.1 Opspanning

Omdat het focus en de scherptediepte van de laserbundel klein zijn, dient het product nauwkeurig te worden ingespannen. Productinklemming is vooral kritisch als er geen hoogtesensor wordt gebruikt (zie § 6.2). Bovendien kan, ondanks de geringe warmte-inbreng tijdens het lasersnijden, het product thermisch vervormen. Deze vervormingen dient men te voorkomen d.m.v. een uitgebalanceerde snijvolgorde (zie § 2.3) en/of een adequate productopspanning. Daarbij dient men de volgende aspecten in acht te nemen:

- ▶ voorkom puntinklemming en/of hoge klemkrachten, waardoor het product ter plaatse van de klem vervormt;
- ▶ aanwezige interne spanningen in het materiaal kunnen het product vervormen, zodra het wordt gesneden;
- ▶ een hoge gasdruk kan het product vervormen;
- ▶ wanneer het product wordt bewogen (zie figuur 2.11b en c), kan het onder invloed van massa-tragheiden vervormen;
- ▶ zorg dat de optiekkop (en de laserbundel) vrij baan heeft langs de opspanmiddelen (botsingsgevaar);
- ▶ een puntsgewijze ondersteuning van het product minimaliseert de reflectie van de laserbundel op deze ondersteuning en heeft zo een positieve invloed op de snedekwaliteit. Bovendien heeft de gasstraal in dat geval vrij baan (zie figuur 2.15);
- ▶ zorg voor een goede bereikbaarheid van de productopspanning i.v.m. het verwijderen van slak en spatten;
- ▶ maak voor de productopspanning bij voorkeur gebruik van warmtebestendige materialen en/of een spatwerende deklaag (coating).

6.2 Sensoren

Een hoogteregeling zorgt voor een constante nozzle-plaat afstand, alsmede voor een constante focuspositie (zie figuur 6.1). Een dergelijk systeem is vooral vereist bij het gebruik van lenzen met een korte brandpuntsafstand en/of het snijden van 3D producten.



figuur 6.1 Een hoogteregeling zorgt voor een constante nozzle-plaat afstand, ondanks variaties in de productgeometrie

De hoogteregeling kan mechanisch of elektronisch zijn uitgevoerd. De mechanische uitvoering bestaat uit een wiel (of een bal) welke aan de snijkop is bevestigd, over het productoppervlak rolt en zo een constante nozzle-plaat afstand, alsook een constante focuspositie garandeert. Deze mechanische hoogteregeling is geschikt voor plaatmateriaal, maar minder geschikt voor 3D producten. De rol kan krassen/groeven op het product achterlaten.

In het geval van een elektronische hoogteregeling wordt de elektrische capaciteit tussen de metalen nozzle en het metalen product gemeten. Deze capaciteit is een maat voor de afstand tussen de nozzle en het productoppervlak. Een regelsysteem in de manipulator past de positie van de snijkop aan indien een afwijkende capaciteit (en dus een variërende nozzle-plaat afstand) wordt gemeten. Deze elektronische hoogteregeling is flexibeler dan de mechanische variant, maar is duurder en kan alleen worden toegepast bij elektrisch geleidende materialen.

7 Praktijkvoorbeelden

7.1 Snijden van een zijgeleiding met CO₂-laser

In deze paragraaf wordt het lasersnijden met een CO₂-laser van een zijgeleiding uit plaatmateriaal uiteengezet (zie figuur 7.1). De lasergesneden uitslag dient, na het kanten en het inpersen van enkele persmoeren, als onderdeel van een dozenopzetmachine voor de verpakkingindustrie.



figuur 7.1 Uitslag van een zijgeleiding van een dozenopzetmachine voor de verpakkingindustrie. Materiaal RVS 1.4301. Dikte 2 mm. Afmeting 446,3 x 146,6 mm²

De werkwijze voor het lasersnijden van de plaatuitslag bestaat achtereenvolgens uit:

- ▶ De contour van de uitslag wordt als een DXF-bestand (bestandformaat voor gevectoriseerde tekeningen) door de afdeling werkvoorbereiding ingelezen in het off line programmeersysteem (zie § 2.3). Hierbij wordt (automatisch) rekening gehouden met de eigenschappen van de gebruikte laserbron (in dit geval een Trumpf L3030 CO₂-laser met flying optics). De werkvoorbereider bepaalt de basis-machine-instellingen, in dit geval: snijsnelheid 22 mm/s, laser vermogen 2,6 kW, focuspositie $z_f = -0,7$ mm, brandpuntsafstand lens $f = 127$ mm (5 inch). Als snijgas wordt stikstof gebruikt (zuiverheid 4.8, druk 1,5 MPa = 15 bar). Afhankelijk van de contourdetails en de verlangde maattoleranties van het product worden de basis-machine-instellingen aangepast. Zo worden kleine gaten (minder dan 50% van de plaatdikte) bij voorkeur pulserend ingestoken. Daarnaast worden scherpe contouren met zogenaamde 'ezelsoren' (zie figuur 2.13) gesneden om verbranding van de punt te vermijden.
- ▶ Het resultaat van de werkvoorbereiding is een NC-code voor de lasermachine, ook wel het snijprogramma genoemd. Daarnaast wordt automatische een document gegenereerd, waarmee de machine-operator instructies krijgt hoe te handelen voor deze snijkus. Hierbij valt te denken aan instellingen, materiaalgegevens en natuurlijk de plaats waar hij de digitale informatie kan vinden op het bedrijfscomputernetwerk.

In dit voorbeeld is de totale contourlengte (inclusief ijlgangen) 2797 mm en er moet 15 keren worden ingestoken;

per product neemt dit alles slechts 1,37 minuut in beslag. De zijgeleidingen zijn in een serie van 8 stuks gesneden, waarbij de kostenopbouw (prijsspeel 2002) er als volgt uit ziet:

- ▶ Materiaal: € 2,75 per stuk;
- ▶ Programmeren: € 1,32 per stuk (ca. 12 minuten totaal);
- ▶ Lasersnijden: € 5,50 per stuk (incl. instelkosten);
- ▶ Totaal € 9,57 per stuk.

Het zal duidelijk zijn dat grote series tot kostprijsreducties zullen leiden. Voordelen van lasersnijden van dit product, t.o.v. pons-nibbelen zijn:

- ▶ Snelheid: Grote delen van de snijcontour zijn recht, waardoor m.b.v. de laser sneller te produceren is dan met een pons-nibbelmachine;
- ▶ Nauwkeurigheid: De laser kan, in tegenstelling tot pons-nibbelen, waar aftekening van nibbelovergangen ontstaan, rechte contouren produceren;
- ▶ Maakbaarheid: Er zijn twee gaten vrij dicht aan de rand van de buitencontour geconstrueerd. Dit is voor de laser geen probleem. Bij pons-nibbelen bestaat het gevaar van vervorming van de plaat, waardoor de vlakheid en maten van de uitslag buiten de tolerantie van 0,1 mm gaan vallen.

7.2 Snijden van pootjukken

In deze paragraaf wordt het lasersnijden met een CO₂-laser van tafelpoten (pootjukken genaamd) uit driehoekige buis behandeld (zie figuur 7.2).



figuur 7.2 Pootjukken opgebouwd uit ongelijkzijdige driehoekige buis (lange zijde ≈ 68 mm, 2 korte zijden ≈ 54 mm). Bij de vierpoot tafels vormt één pootjuk de twee poten aan de zijde van een tafel. De jukken worden verbonden door twee liggers. Op de liggers wordt het blad gemonteerd. Bij de driepoot tafels worden drie pootjukken verbonden met een koppelstuk. Het blad wordt rechtstreeks op de jukken gemonteerd. De tafels zijn in drie uitvoeringen verkrijgbaar: vaste hoogte, hoogte instelbare en hoogte verstelbare uitvoering. De hoogte verstelling wordt gerealiseerd door een aluminium inschuifpoot in de pootjukken

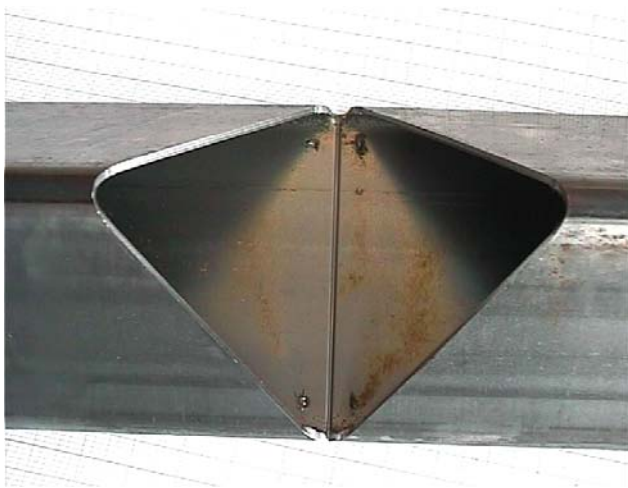
In eerste instantie werd overwogen het juk uit drie resp. twee delen (vier-, driepoot tafel) te maken. Uiteindelijk is gekozen voor het maken van de jukken uit één deel. Daartoe wordt in de buis, met de laser, een 90° uitkapping gesneden, waarna de buis ter plaatse van de uitkapping over de lange zijde haaks omgebogen kan worden (zie figuur 7.3).

De voordelen van deze constructie zijn:

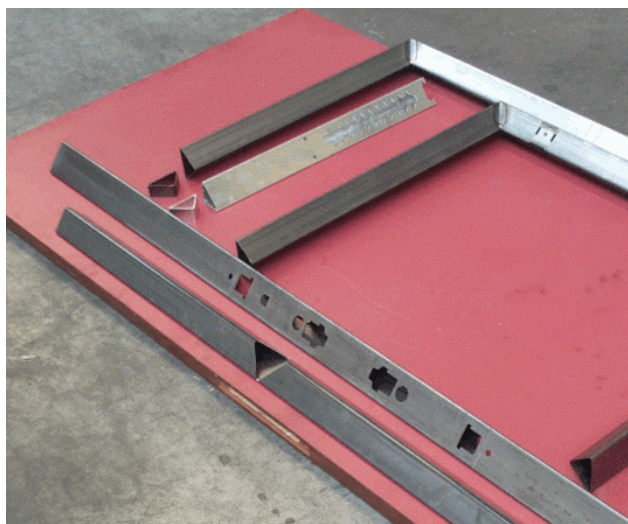
- ▶ Goede visuele kwaliteit van de buitenhoek van de poot en bovendeel van het juk, alsook van de, door lassen verbonden, korte zijden. Er is geen nabewerking nodig;
- ▶ Logistieke voordelen, omdat men met minder onderdelen te maken heeft.

Behalve de 90° uitkapping(en) bevatten de jukken, afhankelijk van de uitvoering, diverse uitsnijdingen, voor

o.a. het hoogteverstelmechanisme, montage van tandwielkastjes t.b.v. de hoogteverstelling, ophanggaten voor het poederlakken (zie figuur 7.4).



figuur 7.3 Een met de laser gesneden 90° uitkapping in de driehoekige buis



figuur 7.4 Gezien de lengte van de jukken, 1 tot 2,5 meter en de aanwezigheid van uitsparingen over de gehele lengte, is het lasersnijden een voor de hand liggende techniek voor het vervaardigen van de pootjukken

Aspecten waaraan speciale aandacht moest worden besteed waren:

- ▶ De baan- en positioneer-nauwkeurigheid van de laserkop t.o.v. de buis, met name bij het snijden van de 90° uitkapping. Dit i.v.m. de geometrische toleranties van de buis en de nauwkeurigheid waarmee de buis kan worden ingespannen in de machine. Bij de inspanning van de buis wordt daarom de lange zijde, door parallel werkende aandrukkers op de korte zijden, tegen een vaste referentie gedrukt. De rotatie van de buis wordt aangedreven op een zogenaamde bril, zo dicht mogelijk bij de laserkop. Dit minimaliseert de invloed van torsie in de buis. Er zijn installaties waarbij via de pusher de rotatie wordt aangedreven. Dit betekent dat bij een torsie van 1° per meter en een buis van 6 meter, het te bewerken vlak 6° verdraaid onder de laserkop kan staan.
- ▶ De machine-instellingen in het bereik van de hoeken tussen de korte en lange zijde, bij het snijden van de

90° uitkapping en het afsnijden van de buis. In dit bereik moet men er rekening mee houden dat de laserbundel, behalve door de te snijden wand, ook door de achterliggende wand heen kan snijden of deze weer kan samensmelten (dus lassen). Dit probleem wordt o.a. veroorzaakt doordat de snijsnelheid bij het ronden van een hoek lager is dan de snijsnelheid in de zijden. Dit probleem werd opgelost door het laservermogen te verlagen bij het ronden van de radius tussen de lange en korte zijden.

Door bovenstaande punten bleek het moeilijk om met een off line programmeerpakket het snijprogramma voor de laser te optimaliseren. De optimalisatie is bereikt door middel van trial and error.

De Balliu laserinstallatie bestaat uit:

- ▶ Een toevoerbunker, waarin plaats is voor ongeveer 100 stalen of aluminium driehoekbuizen van maximaal 6,4 meter lengte. De machine separeert de buizen, draait deze in dezelfde oriëntatie, de lange zijde onder, en biedt de buizen aan een meetpositie aan;
- ▶ De meetpositie. Deze meet de exacte lengte van de te snijden buis;
- ▶ Een 'pusher' en een bril die zorgen voor de positionering van de buis tijdens het snijden. De pusher klemt de buis aan het uiteinde en verplaatst de buis in de lengterichting (X-as). De bril geleidt de buis in de x-richting en roteert de buis (Q-as);
- ▶ Een Rofin Sinar 2000 W CO₂ Slab Laser;
- ▶ Een laserkop met 3 bewegingsassen: Y, X en Z. De Y en X-as (max. slag 300 mm) op de laserkop worden gebruikt voor het snijden van de relatief kleine uitsparingen in de buis. De X-as van de pusher (6400 mm) wordt alleen gebruikt voor het doorzetten van de buis tussen de verschillende uitsparingen. Door de extra X-as van de laserkop (een 'standaard' buizensnijder beschikt alleen over de 'pusher' X-as), kon een winst van 10% in de cyclustijd worden behaald. Bovendien kan er op deze wijze nauwkeuriger worden gesneden. De Z-as wordt aangestuurd door een hoogte-regeling die ervoor zorgt dat de laserkop op een vaste afstand van het materiaal blijft;
- ▶ Een Pick and Place (P&P) unit om de producten af te voeren. De machine legt aluminium inschuifpoten (voor hoogteverstelling) af in 1 van 4 productbakken. Het product wordt pas 'losgelaten' als het product de overige producten (of de bodem) raakt. Deze (niet standaard) functie is toegevoegd i.v.m. geluids-overlast (wanneer men een buis vanaf 10 cm hoogte zou laten vallen levert dit geluidspieken op die ruim boven de 100 decibel kunnen uitkomen). De machine kan de gesneden stalen buizen ook doorvoeren naar een lasrobot voor verdere verwerking. Tussen de snijlaser en de lasrobot zit een kleine buffer van maximaal 20 producten;
- ▶ Een computer (PC) die aan de hand van de gemeten buislengte en de order bepaald welke producten uit de betreffende buis gemaakt kunnen worden. Deze PC geeft, per product dat gemaakt moet worden, een programmanummer door aan de machinebesturing van de laser, waarin zich het snijprogramma (NC-code) bevindt. De operator werkt op de PC met productnummers (12 cijferig).

De gebruikte machine-instellingen zijn weergegeven in tabel 7.1.

De hele installatie (snijlaser & lasrobot) wordt bediend door één operator. De taken van de operator zijn o.a.:

- ▶ Het selecteren van de te maken order;
- ▶ Het laden van de toevoerbunker van de laser met stalen of aluminium buizen;
- ▶ Het be- en ontladen van de lasmal bij de lasrobot;
- ▶ Het verrichten van kwaliteitscontroles.

tabel 7.1 Machine-instellingen voor het snijden van pootjukken

	Staal	Aluminium
materiaaldikte	1,5 mm	1,5 mm
gem. vermogen*	600 W	1900 W
snijgas	N ₂ (16 bar)	N ₂ (18 bar)
boorgas	N ₂ (2 bar)	O ₂ (2 bar)
nozzle-plaat afstand	1 mm	1 mm
diam. nozzle opening	1,5 mm	1,5 mm
brandpuntsafstand lens	127 mm (5")	127 mm (5")
focuspositie z_f	2,2 mm	2,5 mm

* Het vermogen is afhankelijk van de snijnsnelheid. De snijnsnelheid varieert sterk o.a. omdat men bij het snijden van de hoeken te maken heeft met relatieve snijnsnelheden. De laserkop en het product bewegen beiden.

8 Veiligheid

Zoals bij alle bewerkingsmachines moet ook bij laserinstallaties aandacht worden geschonken aan de veiligheid. Wanneer een complete laserinstallatie wordt aangeschaft zal in de meeste veiligheidsvoorzieningen reeds voorzien zijn. De gebruiker dient echter aandacht te besteden aan de volgende twee risico's:

- ▶ blootstelling aan laserstraling;
- ▶ blootstelling aan procesemissies (dampen, deeltjes).

Laserstraling

Laserbronnen en lasersystemen worden in vier risico-classes (1 t/m 4) ingedeeld. De indeling van een laser in een klasse is gebaseerd op de stralingsdosis die de laserbron bij het meest ongunstige gebruik kan veroorzaken (hoe hoger de klasse des te groter de schade). De betreffende laserklasse wordt door de fabrikant op het systeem aangegeven, of moet anderszins door de verantwoordelijke leiding worden vastgesteld.

Hoogvermogen lasers voor het snijden van metalen, vallen altijd in de hoogste gevarenklasse (klasse 4). Gevaar bestaat niet alleen bij het direct kijken in de laserbundel, maar ook nadat de bundel gereflecteerd is op bijvoorbeeld het smeltbad, of een (verkeerd) gepositioneerd product of op een opspangereedschap. Voldoende veiligheid wordt in alle gevallen geboden door een 'lichtdichte' afscherming, waarbinnen zich geen gebruiker bevindt tijdens de bewerking. Het een en ander is vastgelegd in de normen: NEN-EN 10825 [5], NEN-EN 12626 [6], en NEN-EN 12254 [7].

Procesemissies (dampen en deeltjes)

Bij het snijden met lasers kunnen materiaaldampen en stofdeeltjes vrijkomen die schadelijk zijn, en bij onvoldoende afscherming en afzuiging snel tot boven de toelaatbaarheidsgrens (MAC-waarde) uitkomen. Ook (schadelijke) proces- en beschermgassen dienen te worden afgezogen, wanneer deze in grote hoeveelheden vrijkomen.

9 Economische aspecten

Een nadeel van het snijden met een laser, t.o.v. conventionele (thermische) scheidingstechnieken, is de relatief hoge investering voor een lasersnij-installatie. T.o.v. de conventionele technieken is de snijnsnelheid echter vele malen groter, zodat de investering snel kan worden terugverdiend. Zo blijkt een terugverdientijd van een investering van meer dan € 500.000 in een laserinstallatie in minder dan 1 jaar geen uitzondering.

De kosten van een laserinstallatie is opgebouwd uit *vaste* en *operationele* (of variabele) kosten. De vaste kosten, op hun beurt, bestaan uit investeringen in de benodigde apparatuur (laserbron, manipulator, enz.) en de zogenaamde *never*-investeringen. Deze *never*-investeringen hebben betrekking op de organisatie en de productie van een bedrijf. De voorlichtingspublicatie VM 121 "Hoogvermogen lasers voor het bewerken van metalen" [1] gaat dieper in op deze (neven)investeringen. Hier wordt volstaan met tabel 9.1, waarin investeringskosten van een complete installatie voor diverse typen en vermogens worden aangegeven.

tabel 9.1 Prijsindicaties (2006) in Euro's van de verschillende typen lasers voor verschillende vermogens

type laser	vermogen [W]	investeringskosten (incl. koeler) [$\times 1.000$ €]
CO ₂ -laser diffusiegekoeld/slab	1000	90 - 130
	2000	130 - 170
	4000	225 - 270
	8000	350 - 410
cw Nd:YAG-laser lampengepompt	2000	220 - 240
	4000	400 - 450
cw Nd:YAG-laser diodepompt	2000	300 - 350
	4000	500 - 530
diodelaser direct	1000	75 - 100
	2000	100 - 150
	4000	200 - 225
diodelaser fibre koppeling	1000	125 - 150
	2000	175 - 200
	4000	250 - 275
disc-laser	4000	380 - 400
	6000	510 - 530
fiber-laser	2000	210 - 230
	3000	290 - 310

De operationele (of variabele) kosten bestaan uit:

- ▶ loonkosten operator, incl. overheadkosten;
- ▶ stroomverbruik;
- ▶ gasverbruik;
- ▶ slijtdelen laserbron;
- ▶ slijtdelen installatie;
- ▶ gereedschapskosten.

De grootste kostenpost bij de operationele kosten zijn de loonkosten (incl. overhead) van de operator. Daar tegenover staat dat bij laserbewerkingen vaak bespaard kan worden op de nabewerkingen van het product. Er treden immers minder vervormingen op van de producten. Hierdoor kunnen er manuren gespaard worden. De post slijtdelen laserbron is sterk afhankelijk van het type laserbron. De CO₂-laser kent, behalve de lenzen, het uitkoppelenvenster (standtijd circa 3000 uur) en elementen van het koelsysteem, niet veel slijtdelen. Bij de diodepompte Nd:YAG-laser moeten de diodes om de circa 10.000 uur worden vervangen. Bij de lampengepompte Nd:YAG-laser moeten de lampen om de circa 1000 uur worden vervangen. Afhankelijk van het vermogen is het stroomverbruik van de Nd:YAG- en CO₂-lasers fors, vanwege het lage energetische rendement (3 tot 10%). Het gasverbruik is een kostenpost van vergelijkbare grootte als het stroomverbruik.

Gezien de hoge investeringskosten is het dus zaak het aantal uren dat de laser daadwerkelijk wordt gebruikt (bezettingsgraad) zo hoog mogelijk te houden. Om onvoorziene stilstand door onverwachte storingen te voorkomen, zal daarom onderhoud (vervangen slijtdelen) moeten worden ingepland. Daarnaast moet de snijnsnelheid zo hoog mogelijk worden gekozen voor een snelle terugverdientijd. Om de bezettingsgraad van de laser zo hoog mogelijk te krijgen kan worden gedacht aan het combineren van meerdere bewerkingen met één laserbron. Zo kan één laserbron gekoppeld worden aan twee robots,

die om de beurt gebruikmaken van de bron (zie figuur 2.8). Men kan ook één laser inzetten voor meerdere bewerkingen, bijvoorbeeld én snijden én lassen.

10 Probleemoplosser

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de oorzaken van en de oplossingen voor veel voorkomende problemen bij het lasersnijden. De snijproblemen zijn ingedeeld in twee groepen:

- ▶ problemen die optreden indien er een snede is en,
- ▶ problemen die optreden indien de laserbundel niet (of onvoldoende) door het materiaal heen snijdt.

Tabel 10.1 geeft een overzicht van de snedekwaliteit bij verschillende snijparameters.

tabel 10.1 Snedekwaliteit bij verschillende procesparameters

procesparameter	snedekwaliteit	
	als procesparameter te hoog	als procesparameter te laag
laservermogen	toename snedebreedte, braam, tapsheid en golvende <i>striations</i>	afname snedebreedte of geen snede
snijnsnelheid	afname snedebreedte of geen snede. Toename ruwheid (<i>striations</i>)	toename snedebreedte, braamvorming en tapsheid
focuspositie	toename snedebreedte en braamvorming. Diepe <i>striations</i> , of geen snede	toename snedebreedte en braamvorming, of geen snede
druk snijgas	diepe <i>striations</i> . Brede en/of verbrande snede aan de onderzijde	braamvorming, onvoldoende uitdrijving van gesmolten metaal. Soms geen snede
nozzle-plaat afstand	braamvorming	diepe <i>striations</i>
diameter nozzle-opening	braamvorming. Hoog gasverbruik	kritische uitlijning van nozzle t.o.v. laserbundel. Onvoldoende uitdrijving van gesmolten metaal. Soms geen snede

10.1 Problemen als er een snede is

Te grote snedebreedte

Indien de snede te breed is zal meestal ook de braamvorming groter zijn. Controleer in dat geval de volgende punten:

- ▶ Is de focuspositie (figuur 4.4) optimaal? Als het focus te diep onder (te hoog boven) het productoppervlak gepositioneerd is, zal de snedebreedte aan de bovenzijde (onderzijde) te groot zijn.
- ▶ Is het (gemiddelde) laservermogen te hoog?
- ▶ Is de snijnsnelheid te laag?

De snede maakt een hoek met het oppervlak

Is de laserbundel coaxiaal uitgelijnd met de focuseringsoptiek (zie blz 9 "uitlijning gasnozzle")? Zorg, indien de richtlaser (*pilot laser*) wordt gebruikt om dit te controleren, dat de richtlaser en de laserbundel coaxiaal zijn uitgelijnd.

Te veel braam

Controleer bij te veel braam eerst de punten hierboven, bij "Te grote snedebreedte". Excessieve braam treedt ook op als het gesmolten metaal onvoldoende wordt uitgedreven. Controleer daarom de volgende punten:

- ▶ Is de druk van het snijgas te hoog of te laag? Controleer daarom de flesdruk en de instelling van het reduceerventiel (drukregelaar). Ga ook na of er een

lek is ontstaan in de gaslangen/-buizen t.g.v. spatpen, vonken, gereflecteerd laservermogen of losse fittingen.

- ▶ Is de nozzle-plaat afstand te groot? In dat geval wordt niet voldoende gas door de snede geblazen.
- ▶ Is de diameter van de nozzle-opening te groot, of door slijtage te groot geworden? In dat geval wordt het gas niet precies door de snede geblazen.

Onregelmatige braam (aan één zijde van de snede)

Indien er enkel (of meer braam) aan één zijde van de optreedt, zal dit meestal ook variëren met de snijrichting. Controleer in dat geval de volgende punten:

- ▶ Is de laserbundel juist (coaxiaal) uitgelijnd met de nozzle-opening?
- ▶ Is de nozzle-opening gedeeltelijk verstopt/geblokkeerd t.g.v. van spatten of andere vervuiling?
- ▶ Is de nozzle-opening beschadigd door een botsing (met het product of opspanmiddelen) of is de nozzle-opening aangetast door een onjuist uitgelijnde laserbundel?
- ▶ Is de intensiteitsverdeling van de laserbundel (figuur 2.3) asymmetrisch? Controleer dit d.m.v. een *mode burn* (figuur 2.4).

Te ruwe snijkant (diepe striations)

Als het gesmolten metaal middels een te turbulente gasstroom (veel wervelingen) uit de snede wordt verdreven, zal de vorming van *striations* (figuur 1.2) groot zijn.

Controleer daarom de volgende punten:

- ▶ Is de gasdruk te hoog?
- ▶ Is de nozzle-plaat afstand te klein?

Verbranding van de snede

Verbranding van de snede treedt op als (te) veel zuurstof reageert met het gesmolten metaal. Controleer daarom de volgende punten:

- ▶ Is de gasdruk te hoog? In geval van het gebruik van een niet-reactief gas kan in dat geval zuurstof uit de omgeving door de hoge gasstroom in de snede worden meegezogen t.g.v. turbulentie (gaswervelingen).
- ▶ Is de snijnsnelheid te laag? In dat geval staat het gesmolten metaal te lang bloot aan zuurstof.

10.2 Problemen bij geen (of onvoldoende) snede

10.2.1 Problemen bij geen snede

Indien er in het geheel geen snede tot stand komt, dient men eerst een aantal algemene punten te controleren. Daarna dient men een aantal aspecten van het bundeltransport (§ 2.3) te controleren.

Algemene controlepunten

- ▶ Is het (gemiddelde) laservermogen te laag om een snede te kunnen genereren bij de gegeven lassnelheid? Het laservermogen kan zijn afgenomen t.g.v. vervuiling van het gas in de resonator (CO₂-laser), slijtage van de lampen en dioden (Nd:YAG-laser), onjuiste uitlijning of vervuiling/slijtage van de optische elementen (m.n. de uitkoppelspiegel) in de resonator (hoofdstuk 2). Controleer daarom het uitgestuurde laservermogen m.b.v. een vermogensmeter.
- ▶ Is de snijnsnelheid te hoog om een snede te kunnen genereren bij het gegeven laservermogen?
- ▶ Is de focuspositie (figuur 4.4) optimaal? Als het focus te diep onder (te hoog boven) het productoppervlak gepositioneerd is, zal de diameter de laserspot op het productoppervlak te groot (en de intensiteit te laag) zijn om het materiaal te smelten. Als de focuseringsoptiek vervangen is, kan het nodig zijn om de optimale focuspositie opnieuw te bepalen.
- ▶ Wordt de juiste optiek met de juiste brandpuntsaf-

stand gebruikt? Optiek met een te lange brandpuntsafstand resulteert in een te groot focus (figuur 2.10) en heeft een andere optimale focuspositie dan een lens met een korte brandpuntsafstand.

Controlepunten m.b.t. het bundeltransport

Fouten in het transport van de laserbundel via spiegels of glasfibers naar de focuseringsoptiek kunnen leiden tot vermogensverlies, waardoor het niet mogelijk is een snede te genereren. Controleer daarom de volgende punten:

- ▶ Zijn alle spiegels in het bundelpad schoon? Controleer ook (het debiet van) de gasbescherming (incl. filters) van deze spiegels (indien aanwezig).
- ▶ Heeft de laserbundel 'vrij baan' van laserbron tot aan de focuseeroptiek? D.w.z. raakt de laserbundel nergens bundelafscherming? Dit kan worden herkend aan een onvolledige *mode burn* (figuur 2.4) of een *mode burn* van de ongefocuseerde bundel.
- ▶ Is de richtlaser (*pilot* laser) uitgelijnd met de laserbundel? Zijn beide bundels gecentreerd t.o.v. van de spiegels van het bundeltransportsysteem en de focuseeroptiek? Controleer kan plaatsvinden d.m.v. *mode burn* van de ongefocuseerde bundel, met een in het bundelpad geplaatst richtkruis (bijvoorbeeld van koperdraad) waarop de richtlaser is uitgelijnd.
- ▶ Wordt het laservermogen goed ingekoppeld in de glasfiber (zie figuur 2.8)? Vergelijk daartoe het ingestelde laservermogen met het (gemeten) vermogen dat de fiber verlaat. Dit laatste mag niet lager zijn dan circa 90% van het ingestelde laservermogen.

10.2.2 Problemen bij onvoldoende snede

Algemene controlepunten

- ▶ Is de nozzle-plaat afstand constant over de gehele lengte van de snijcontour? Controleer dit m.b.v. afstandplaatjes tussen nozzle en product op verschillende plaatsen langs de contour. Controleer bij gebruik van een nozzle-plaat afstandsensor (§ 6.2) de instellingen van het regelsysteem.
- ▶ Controleer of de convergerende laserbundel die de optiek verlaat (figuur 2.9) wordt belemmerd door obstakels (bijvoorbeeld opspanklemmen) of delen van het product zelf (een flens of een wand)? Dit kan worden nagegaan door een stuk tape op het 'verdachte' obstakel te plakken en te inspecteren op brand(plekken) na het maken van een snede.

Controlepunten m.b.t. het bundeltransport en focusering

- ▶ Indien de snedekwaliteit geleidelijk is afgenomen (gedurende een aantal dagen of weken), kan er thermische focusering zijn opgetreden van de lens. Dit kan voorkomen wanneer de standtijd van de lens (bijna) is overschreden en uit zich in een schijnbare verkorting van de brandpuntsafstand. Maak ter controle een *mode burn*. Een vergelijkbaar effect treedt op als de ongefocuseerde bundeldiameter D toeneemt t.g.v. een (bijna) versleten uitkoppelspiegel (zie figuur 2.9 en formule 2.3). Demonteer ter controle de focuseeroptiek, maak een *mode burn* en vergelijk deze met de verwachte (afmetingen van de) *mode burn*. Controleer ook de toestand van de resonator (zuiverheid van het gas in de CO₂-laser, kwaliteit van het koelwater, enz.).
- ▶ Is de koeling van het bundeltransportsysteem en de focuseeroptiek afdoende? De behuizing van de optiek en het koelwater mogen niet meer dan handwarm zijn.
- ▶ Is de optiek vrij van vuil en onbeschadigd (geen krassen en/of putjes) en vrij van vuil (spatten, roet)? Vervuiling van optiek leidt tot absorptie van laserenergie en opwarming van de lens. Dit resulteert in

een schijnbare verkorting van de brandpuntsafstand (zie hierboven). Verbeter de gasbescherming van de optiek als het probleem zich blijft herhalen. Dit is met name belangrijk bij het gebruik van lenzen met een korte brandpuntsafstand.

11 Literatuur en normen

De (procedure van de) beoordeling van de kwaliteit van de snede is vastgelegd in de Duitse norm DIN 2310 [4] en in Duitse VDI *Richtlinie* 2906 Blatt 8 [3]. De NEN-EN norm 12584 [8] en NEN-EN-ISO norm 9013 [9] definiëren o.a. de kwaliteitstoleranties van thermisch snijden (waaronder lasersnijden). Afnametests voor twee-dimensionale CO₂-lasersnij- en -lasinstallaties zijn vastgelegd in de NEN-EN-ISO 15616 norm [10]. In de publicatie VM 114 "Scheidingstechnieken voor metalen" [11] wordt nader ingegaan op de eigenschappen en de voor- en nadelen van de verschillende scheidingstechnieken. De voorlichtingspublicatie VM 121 "Hoogvermogen lasers voor het bewerken van metalen" [1] gaat dieper in op de mogelijkheden en beperkingen van lasers.

12 Referenties en bronvermelding

Referenties

- [1] Römer, G.R.B.E.; Hoogvermogen lasers voor het bewerken van metalen, VM121, Vereniging FME-CWM, Zoetermeer, 2002, aangepast in 2009.
- [2] R.F. de Graaf; Laser cutting of hybrid laminates. Proefschrift Universiteit Twente, 2002, ISBN 90-365-1703-6.
- [3] VDI 2906: Richtlinie Blatt 8: Schnittflächenqualität beim Schneiden, Beschneiden und Lochen von Werkstücken aus Metall; Laserstrahlschneiden.
- [4] DIN 2310: Teil 1: Thermisches Schneiden; Allgemeine Begriffe und Benennungen. Teil 5: Thermisches Schneiden; Laserstrahlschneiden von metallischen Werkstoffen; Verfahrensgrundlagen, Güte, Maßtoleranten.
- [5] NEN-EN 10825: Veiligheid van laserproducten - Apparatuurclassificatie, eisen en gebruikershandleiding.
- [6] NEN-EN 12626: Veiligheid van machines - Machines die gebruikmaken van lasers - Veiligheidseisen.
- [7] NEN-EN 12254: Afschermingen voor werkplekken met lasers - Veiligheidseisen en beproeving.
- [8] NEN-EN 12584: Onvolkomenheden bij brandsnijvlakken, lasersnijvlakken en plasmassnijvlakken.
- [9] NEN-EN-ISO 9013: Thermisch snijden; Classificatie van thermische doorsnijdingen; Geometrische productspecificatie en kwaliteitstoleranties.
- [10] NEN-EN-ISO 15616 (ontw.): Acceptance tests for CO₂-laser beam machines for welding and cutting.
- [11] VM 114: Scheidingstechnieken voor metalen. Vereniging FME-CWM, Zoetermeer, 1998.
- [12] Tech-Info-blad TI.99.12; IOP Metalen nr. 2.5: Laser- en waterstraalsnijden van gelamineerde en beklede plaat. Vereniging FME-CWM, Zoetermeer, 2000.

Bronvermelding

- Trumpf Laser Nederland: figuren 1.2, 2.15, 4.1, 4.2, 4.3 en 4.5;
- Rofin-Baasel Benelux: figuur 2.4;
- Demar Laser: figuur 7.1;
- Ahrend: figuren 7.2, 7.3 en 7.4;
- Hoek Loos: gasgegevens.

Alle overige gegevens en figuren in deze praktijkaanbeveling zijn aangeleverd (of aangepast) door de Leerstoel Toegepaste Lasertechnologie van de Universiteit Twente te Enschede.

Auteur(s)

De eerste uitgave van deze praktijkaanbeveling is tot stand gekomen middels een samenwerkingsverband van de Bond voor Materialenkennis, de Metaalunie, de vereniging FME-CWM en PMP, in het kader van een pionierproject getiteld "De toegevoegde waarde van hoogvermogen lasers voor het bewerken van metalen en kunststoffen voor de Nederlandse industrie".

De auteur, G.R.B.E. Römer (Universiteit Twente) werd ondersteund door een werkgroep bestaande uit: P. de Boer (TNO Industrie), P. Boers (FME), J. Dijk (Trumpf Laser Nederland), J. van Eijden (namens Syntens), W.G. Essers, P. ter Horst (Demar Laser), D.R.J. Lafèbre (Hoek Loos), J. Meijer (Universiteit Twente), J. OldeBenneker (NIMR), R. Pieters (NIMR) en P. Scheyvaerts (Rofin-Baasel Benelux).

In 2008/2009 is deze publicatie door P.F. Senster (TNO Industrie en Techniek) herzien en licht aangepast aan de huidige stand van de techniek.

Eindredactie: P. Boers (Vereniging FME-CWM)

Technische informatie

Voor technisch inhoudelijke informatie over de in deze voorlichtingspublicatie behandelde onderwerpen kunt u zich richten tot de

Leerstoel Toegepaste Lasertechnologie van de Universiteit Twente:

Bezoekadres: Drienerlolaan 5, 7522 NB Enschede
Correspondentie-adres: Faculteit Construerende Technische Wetenschappen,
Postbus 217, 7500 AE Enschede
Telefoon: (053) 489 2502
Fax: (053) 489 3631
Internet: <http://www.wa.ctw.utwente.nl>

Informatie over, en bestelling van VM-publicaties

Vereniging FME-CWM/Industrieel Technologie Centrum (ITC)

Bezoekadres: Boerhaavelaan 40,
2713 HX Zoetermeer
Correspondentie-adres: Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer
Telefoon: (079) 353 11 00/353 13 41
Fax: (079) 353 13 65
E-mail: info@fme.nl
Internet: <http://www.fme.nl>

© Vereniging FME-CWM/augustus 2009 - 2^e druk

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke ander wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Hoewel grote zorg is besteed aan de waarborging van een correcte en, waar nodig, volledige uiteenzetting van relevante informatie, wijzen de bij de totstandkoming van de onderhavige publicatie betrokkenen alle aansprakelijkheid voor schade als gevolg van onjuistheden en/of onvolkomenheden in deze publicatie van de hand.

Vereniging FME-CWM
afdeling Technologie en Innovatie
Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer
telefoon 079 - 353 11 00
telefax 079 - 353 13 65
e-mail: info@fme.nl
internet: www.fme.nl