

# Boor- en snijtoepassingen van een Nd-YAG-laser

Dr.ir. G.J.N.E. de Vlieger  
Eldim BV, Arcen

De laatste drie jaren is het aantal vastestof-lasers dat in Nederland ingezet wordt bij de bewerking van materialen sterk toegenomen. De meeste vastestof-lasers vinden hun specifieke toepassing in het punt- of naadlassen van elektronische componenten. Slechts enkele systemen worden ingezet bij zowel het lassen, snijden, boren en bewerken van keramiek. Meestal bestaan de systemen uit een laser met een drie- of vierassige positioneereenheid. Hiermee kunnen in het algemeen slechts tweedimensionale of driedimensionale-rotatiesymmetrische produkten bewerkt worden. Slechts een vijf-assig systeem laat toe een driedimensionaal produkt te bewerken.

In dit artikel wordt onder meer ingegaan op de problematiek bij het laserbewerken, boren en snijden, van drie-dimensionale produkten met een gepulste vastestof-laser. Daartoe zal eerst een korte beschrijving worden gegeven van de keuze van het type laser, de parameters van de laser en een verklaring van de wisselwerking tussen de laserenergie en materiaal. In een volgend hoofdstuk wordt nader ingegaan op de laserparameters bij het boren en snijden. Ook de metallurgische aspecten krijgen hun aandacht. De totale bewerkingskosten voor een vijfassige lasermachine worden vergeleken met andere bewerkingstechnieken. Als laatste wordt gekeken naar de toepassingsmogelijkheden van vijfassige systemen in de toekomst.

## Type vastestof-laser

Sinds vijftien jaar is de firma Eldim gespecialiseerd in het bewerken van nikkel-cobaltlegeringen voor de vliegtuigmotorenindustrie. Met behulp van vonkverspaningstechnieken (EDM), elektrochemisch boren (ECD) en sinds ruim twee jaar de lasertechniek (LMBR), worden in onderdelen van vliegtuigmotoren koelgaten geboord. Bij de keuze van het type laser is ervan uitgegaan dat deze kostenbesparend moet zijn ten opzichte van de beide andere bewerkingstechnieken. Hiervoor kwamen de volgende lasers in aanmerking:

### Robijnlaser:

Het actieve medium is hier  $Al_2O_3$ , verontreinigd met 0,05% chroom-ionen. De cilindrische laserstaaf wordt optisch geëxciteerd met een xenonflitslamp. De lasergolflengte is 0,694  $\mu m$ , een golflengte waarbij de absorptie voor het te bewerken materiaal ongeveer 20% à 30% is. Door de slechte warmtegeleiding is de maximale laserfrequentie beperkt tot enkele pulsen per seconde. In een later hoofdstuk zullen we zien dat dit niet aanvaardbaar is bij optimale boor- en snijtoepassingen. Een tweede mogelijkheid was de Neodymium-glas-laser.

### Neodymium-glas-laser:

In dit geval is het actieve medium een glasstaaf, verontreinigd met 3%–5% neodymium-ionen. De golflengte van deze laser ligt in het nabije infrarood bij 1,06  $\mu m$ .

In het algemeen is het uitgangsvermogen van deze lasers hoger dan voor een robijn-laser. De laserstaaf is in het algemeen goedkoper dan een robijnstaaf. Het grootste nadeel is hier echter de zeer slechte warmtegeleiding van de laserstaaf, waardoor de maximale laserfrequentie beperkt is tot ongeveer één puls per seconde. We zullen zien dat dit type laser alleen wordt toegepast bij een bepaalde boortechniek. We komen hier in een later stadium op terug. De derde mogelijkheid was de neodymium-YAG-laser.

### Neodymium-YAG-laser

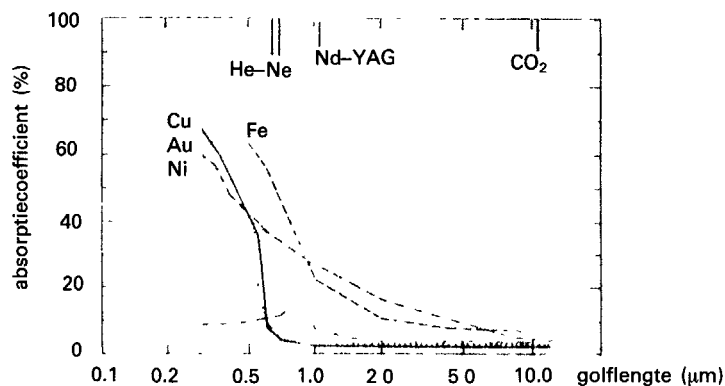
Bij dit type laser bestaat het actieve medium uit een cilindrische staaf van het kristal yttrium aluminium granaat, verontreinigd met 1%–3% neodymium-ionen. In tegenstelling tot de Nd-glas-laser is de thermische geleiding van de Nd-YAG veel beter, waardoor het kristal veel efficiënter gekoeld kan worden. De maximale laserfrequentie is hier 200 Hz. Optische excitatie vindt

plaats door één of twee krypton flitslampen, die in het brandpunt van een elliptische configuratie worden geplaatst. Het voordeel van een elliptische configuratie is dat alle fotonen die uitgezonden worden in één brandpunt van de ellips, worden gefocuseerd in het andere brandpunt waar de laserstaaf zich bevindt. Bij de keuze van de stralingsbron (flitslamp), moet geëist worden dat het emissiespectrum van deze flitslamp zoveel mogelijk samenvalt met de absorptiebanden van de laserstaaf ( $Nd^{3+}$ ). Meestal gebruikt men daarvoor water- of luchtgekoelde xenon- of kryptonflitslampen. Een maximale pompefficiëntie wordt verkregen als de gemiddelde ellips-diameter klein is ten opzichte van de totale lengte van de reflector, bij een kleine diameter van de laserstaaf en de flitslamp. In het algemeen wordt bij de Nd-YAG-laser slechts 3% van de elektrische energie omgezet in laserenergie. Van de totale elektrische energie gaat 30% verloren door oppervlakte-absorptie aan de reflectorwand, 15% door warmteverlies in het actief medium en ongeveer 52% door warmteverlies in de flitslampen. Door het warmteverlies in het actief medium treedt lenswerking op, waarvoor door middel van een bundelverbreder binnen de caviteit, gecompenseerd dient te worden. De lasergolflengte is 1,06  $\mu m$ . Het gemiddeld vermogen ligt rond de driehonderd Watt, hetgeen resulteert in een maximale vermogensdichtheid van  $10^6$  à  $10^7$  Watt/cm<sup>2</sup>. Deze vermogensdichtheid geeft de mogelijkheid de laser toe te passen in een aantal bewerkingstechnieken.

## Metaalbewerking met een Nd-YAG-laser

Eén van de bepalende grootheden bij het materiaalbewerken met lasers is de absorptie van de laserstraling. In figuur 1 is de golflengte afhankelijke absorptiefactor gegeven voor een aantal metalen. Ook de warmtegeleidingscoëfficiënt en de soortelijke warmte van het metaal zijn zeer belangrijk. Afhankelijk van de bereikte oppervlaktetemperatuur  $T_{opp}$  worden de volgende lasertechnieken toegepast:

$T_{opp} < T_{smelt}$  (oppervlaktehardening)



Figuur 1

$T_{smelt} < T_{opp} < T_{verdamp}$  (lassen, oppervlaktelegeren,...)

$T_{opp} > T_{smelt}$  (snijden en boren)

Hieringeven  $T_{smelt}$  en  $T_{verdamp}$  respectievelijk de smelt- en verdampingstemperatuur aan van het bewerkte metaal. In dit artikel zullen we alleen de laatste toepassing verder beschouwen ( $T_{opp} > T_{smelt}$ , boren/snijden). Daartoe wordt eerst de interactie van de laserfotonen met het materiaal nader beschreven.

### Interactie laserlicht – materiaal

Het wezenlijke bij de interactie is de korte interactietijd van de hoge laser-energiemogelijkheid met het materiaal. De fotonenabsorptie vindt in eerste instantie plaats in een gebied tot op ongeveer 0,1 µm diepte. Voor een maximale inkoppeling moet de laserpuls een stijgtijd hebben van 1 µs, een gemiddelde vermogensdichtheid van  $10^6$  à  $10^7$  W/cm<sup>2</sup> en een minimale lengte van 0,1 msec.

Nadat het materiaal de verdampingstemperatuur heeft bereikt start het boor- of snijproces door verdamping en het wegblazen van het gesmolten materiaal uit het gat of de snede. De verhouding tussen de hoeveelheid verdampt en gesmolten materiaal is afhankelijk van de vermogensdichtheid en komt in het voordeel van het verdampingproces bij hogere laserenergie. Een deel van de laserenergie wordt geabsorbeerd door de metaaldamp, die daarna ioniseert. Tevens wijzigt door het smelten van het materiaal de absorptiecoëfficiënt zeer sterk (bijv. van 10%–90%). De laserenergie wordt daarna nagenoeg volledig geabsorbeerd. Uit metingen blijkt dat de scheiding tussen damp en gesmolten materiaal zich met een constante snelheid door het materiaal beweegt (0,5 à 2 m/sec). Kennis van de interactie tussen laserlicht en materiaal wordt nu verder gebruikt in de beschrijving van de boor- en snijtechnieken. Bij het laserboren onderscheiden we een tweetal technieken.

### Laserboren met stilstaande focuseringslens ("percussion")

In deze techniek worden de gaten geboord door middel van een serie laserpulsen. De laserstraal staat hier stil ten opzichte van het werkstuk. Het aantal pulsen is afhankelijk van de gevraagde gatdiameter en de dikte van het materiaal. In dit directe boorproces wordt de laserenergie tot een diameter gedefocuseerd, die gelijk is aan de te boren gatdiameter. Bijna het totale volume moet hier verdampen. Belangrijke te kiezen laserparameters zijn de energie, energiedistributie, diameter van de focus en de positie van het focuseringspunt. In een later hoofdstuk zullen we zien dat er een minimale vermogensdichtheid nodig is om de laser in deze boortechniek toe te passen. Voor een laser met gemiddeld vermogen van 300 Watt kunnen volgens deze techniek slechts gaten geboord worden met een diameter kleiner dan 0,6 mm. Deze techniek wordt vaak toegepast met Nd-glas- of robijnlasers. Met één of twee laserpulsen wordt een gat geboord. Bij een lagere vermogensdichtheid wordt de oppervlakteruwhoed groter (tot 50 µm). Deze nadelen vinden we niet meer terug in een tweede boortechniek.

Tabel 1

	Boortechniek	
	Percussion	Trepanning
<b>Parameters</b>		
Gatdiameter	0,15 – 0,6 (mm)	0,15 – 3 (mm)
Materiaaldikte	0,1 – 4 (mm)	0,1 – 8 (mm)
Laserfrequentie	20 – 25 (Hz)	30 – 100 (Hz)
Pulslengte	1,4 – 1,8 (msec)	0,3 – 1,3 (msec)
Laserenergie	4 – 6 (Joule)	0,8 – 4 (Joule)
<b>Micro-aspecten</b>		
Oppervlakteruwhoed gesmolten laag	20 – 70 µm	20 – 40 µm
Coniciteit v.h. gat	50 – 75 µm	20 – 50 µm
	0,02 – 0,15 (mm/mm)	0,01 (mm/mm materiaaldikte)
Micro scheurvorming	in de gesmolten laag	geen
<b>Boortijd</b>	0,3 – 2,0 (sec/gat)	0,8 – 8 (sec/gat)*

\* Afhankelijk van gatdiameter en materiaaldikte

### Laserboren met bewegende focuseringslens ("trepanning")

"Trepanning" is een speciale toepassing van lasersnijden. In deze techniek worden de gaten uitgesneden door overlappende pulsen van de laser. De as van de laserbundel loopt een of meerdere keren langs de wand van het te boren gat. Deze rotatie wordt verkregen door de focuseringslens cirkelvormig te verplaatsen ten opzichte van de laserbundel. Met deze techniek kunnen gaten worden geboord die vele malen groter zijn dan de gefocuseerde spotdiameter. Meestal wordt bij de "trepanning"-techniek gebruik gemaakt van een co-axiale gasstroom, die het boorproces kan versnellen. Lucht en zuurstof zijn de meest gebruikte gassoorten.

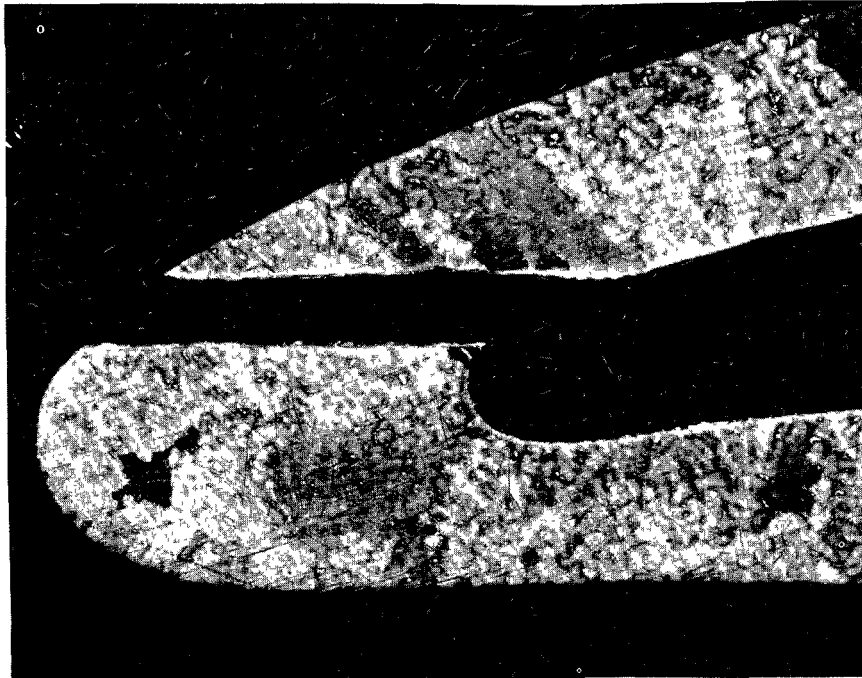
Het belangrijkste voordeel van het "trepanning"-boren is de verbeterde gat-kwaliteit, wat betreft de paralleliteit en de dikte van de gesmolten laag. Tevens zijn de laserparameters onafhankelijk van de gatdiameter omdat de spotdiameter constant blijft. Het nadeel van deze techniek is dat een laser met een lage bundeldivergentie (minder dan 2 milliradianen) noodzakelijk is, die meestal erg kostbaar zijn. Hoe kleiner de divergentie van de laserbundel, des te kleiner wordt de spotdiameter en des te hoger is de vermogensdichtheid op het oppervlak. Een ander nadeel van deze techniek is dat niet "on-the-flight"-geboord kan worden, in tegenstelling tot de "percussion"-boortechniek. Een vergelijking van beide boortechnieken wordt in tabel 1 gegeven.

In figuur 2a en 2b is een langs- en dwarsdoorsnede gegeven van een volgens de trepanning- en percussie techniek geboord gat.

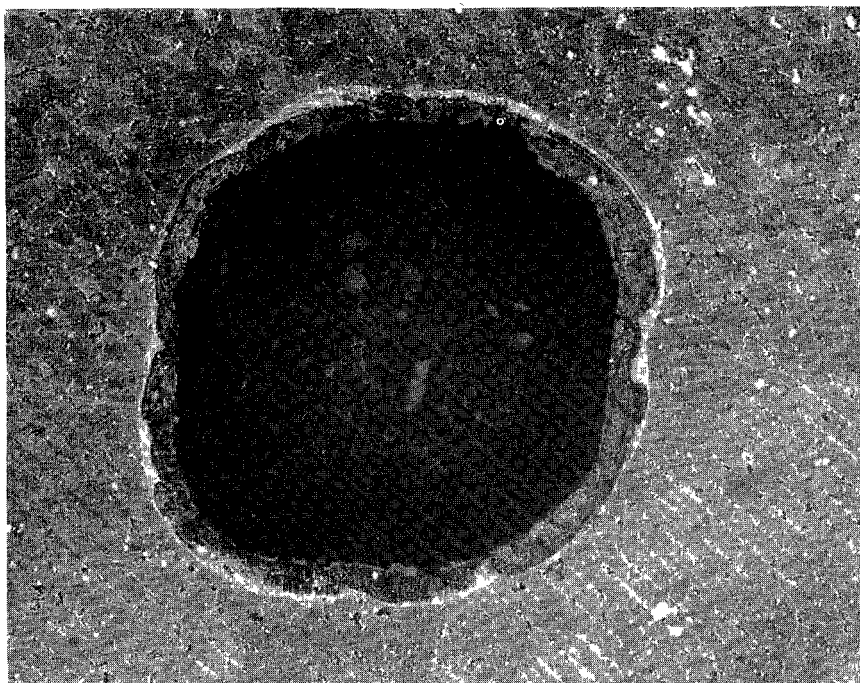
In figuur 3 is het histogram gegeven voor de gatdiameter van 300 in "trepanning" geboorde gaten. Het materiaal is een één-kristal van een nikkel-legering, dikte 2,5 mm. Gatdiameter  $0.240 \pm 0.015$ ! Bij de "trepanning"-techniek wordt de bewerkingstijd per gat bepaald door de bij de gegeven materiaaldikte behorende maximale snijsnelheid. In het volgende hoofdstuk zal ingegaan worden op deze effecten.

### Snijden van metalen met een gepulste Nd-YAG-laser

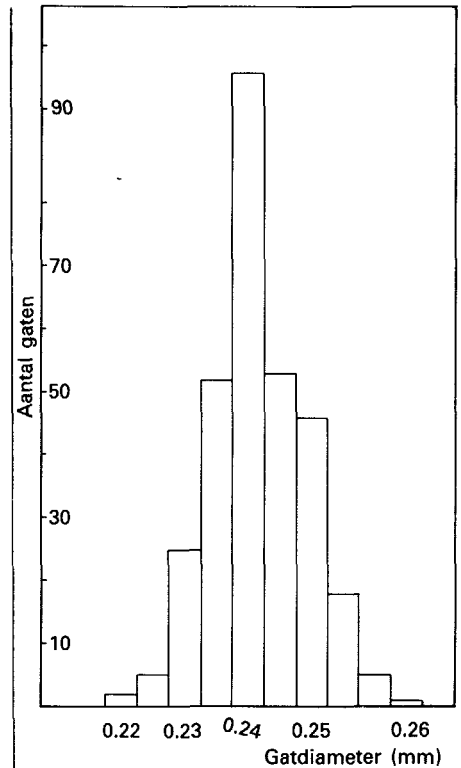
Bij snijtoepassingen is de benodigde vermogensdichtheid in het algemeen lager dan bij boortoepassingen. Immers, het materiaal hoeft slechts de smelttemperatuur te bereiken. Het gesmolten materiaal wordt met een co-axiale gasstroom uit de snede geblazen. Zuurstof verhoogt de snijsnelheid, als gevolg van de exotherme



Figuur 2a Langsdoorsnede van een gat  $\varnothing 0.32$  mm. Vergroting  $\times 25$



Figuur 2b Dwarsdoorsnede van een gat  $\varnothing 0.37$  mm Vergroting  $\times 156$  Percussion-techniek



Figuur 3 Histogram van 300 geboorde gaten.  $\varnothing 0.24 \pm 0.015$  mm

reactie die plaatsvindt. Niet alleen de snijsnelheid maar ook de snijkwaliteit wordt sterk beïnvloed door de gebruikte gassoort. Maximale snijsnelheid bij een acceptabele kwaliteit is hier het argument.

Bij het snijden met een pulslaser is van snijden nog sprake als de verplaatsing van het werkstuk tussen twee pulsen van de laser, kleiner is dan de minimale diameter van de gefocusseerde laserbundel. Een overlapping van 20% is noodzakelijk voor een acceptabele snijkwaliteit. De minimale focusdiameter van het Eldim-lasersysteem is 0,14 mm. Dit betekent dat de maximale snijsnelheid een functie is van de laserfrequentie:

$$v_{\max} \text{ (mm/min)} = \text{tg } \alpha \times f \text{ (Hz)}$$

met  $\text{tg } \alpha = 0,11 \text{ (mm)}$ , (80% van 0,14 mm)

Een tweede effect dat een rol speelt bij het lasersnijden is de vermogensdichtheid ter plaatse van het focuspunt. Immers, een minimale vermogensdichtheid moet aanwezig zijn om het materiaal met dikte  $d$  te kunnen snijden. Hieraan ligt een eenvoudige theoretische uitleg ten grondslag. Bij het snijden van metalen is een zekere hoeveelheid energie per  $\text{cm}^3$  nodig, gegeven door de grootte  $\rho$  (E). Dit is een specifieke materiaalconstante, onder meer afhankelijk van de soortelijke

warmte, de warmte-geleidingscoëfficiënt en de reflectiecoëfficiënt. Een eerste orde verband tussen de minimale vermogensdichtheid,  $P/S$ , materiaaldikte  $d$ , maximale snijsnelheid  $v$  en de specifieke materiaalconstante  $\rho(E)$  wordt gegeven door:

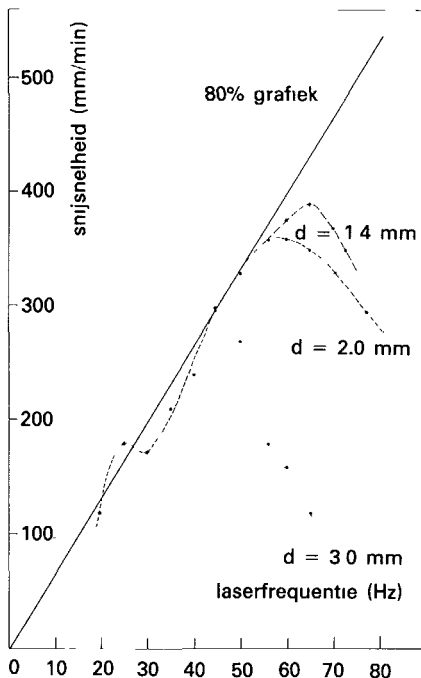
$$\frac{P}{S} = \rho(E) v d$$

Hierin is  $\rho(E)d = \text{tg}\beta$  een gegeven voor het te bewerken materiaal.

Bij het snijden van metalen met een gepulste Nd-YAG-laser zijn nu twee gebieden te onderscheiden:

1. De vermogensdichtheid is voldoende om het materiaal met dikte  $d$  te snijden. De begrenzing van de snijsnelheid wordt hier gegeven door de laserfrequentie.
2. Bij hogere laserfrequentie, 50 à 60 Hz, is de vermogensdichtheid onvoldoende om materiaal met dikte  $d$  te snijden.

Dit betekent dat de snijsnelheid als functie van de laserfrequentie bij lagere frequenties (40 Hz) de "80%"-grafiek volgt, terwijl bij hogere frequenties de vermogensdichtheid bepalend wordt. De grafiek van de snijsnelheid als functie van de laserfrequentie heeft dus een maximum, dat bij lagere frequenties ligt naarmate de dikte van het materiaal toeneemt ( $\text{tg}\beta$  wordt groter). In figuur 4 is voor roestvaststaal 304 de maximale snijsnelheid gegeven als functie van laserfrequentie, voor verschillende materiaaldikte.



Figuur 4

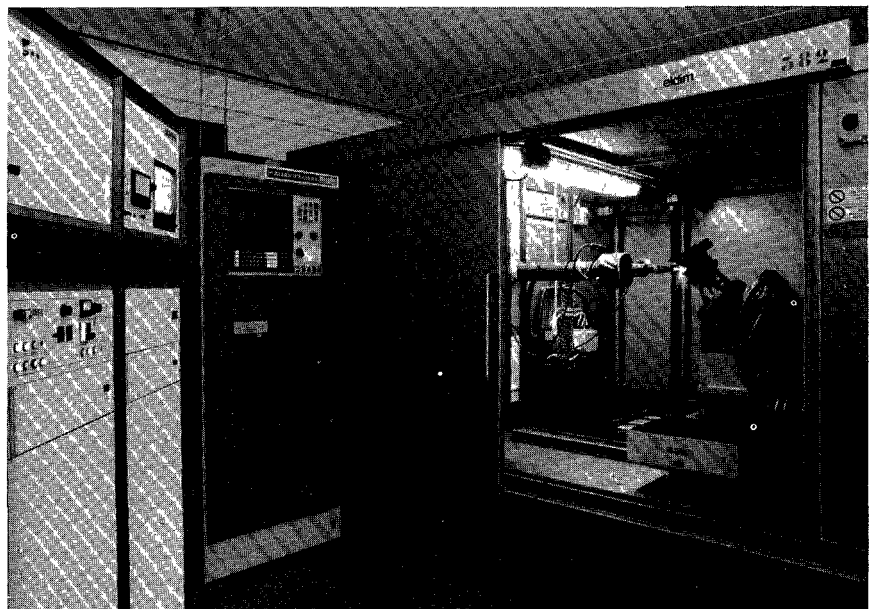
Het is nu ook duidelijk dat de boortijden per gat, in de trepanning-techniek, afhankelijk zijn van de maximale snijsnelheid. Hoe een vijfassig lasersysteem wordt toegepast bij het snijden en boren van driedimensionele producten wordt beschreven in het volgende hoofdstuk.

### Beschrijving van een vijfassig lasersysteem

Voor het bewerken van driedimensionale producten, zoals leid- en loopschoepen en onderdelen van verbrandingskamers is een vijfassig systeem noodzakelijk. Het systeem bestaat uit 3 lineaire assen ( $x$ ,  $y$  en  $z$  met respectievelijk een slag van 600, 600 en 900 mm) en 2 rotatie-assen  $A$  en  $B$ , met een hoekbereik van respectievelijk  $135^\circ$  en  $360^\circ$  (zie figuur 5). Het driedimensionale product, bijvoorbeeld een loopschoep, wordt gefixeerd in een stuk gereedschap. Ten opzichte van een referentiepunt in het gereedschap worden de coördinaten ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $A$  en  $B$ ) van de te boren gaten berekend. Deze coördinaten worden via een ponsband ingelezen in het geheugen van de besturing. Tijdens het bewerken van het product wordt het programma stap voor stap afgewerkt. Heeft de positioneerende de gevraagde coördinaten bereikt, dan wordt de laserenergie gefocuseerd op het oppervlak. Het gevraagde gat wordt door een circulaire beweging ( $x^1$ - en  $y^1$ -as) van de focuslens uit het materiaal gesneden ("trepanning"). Nadat het gat geboord is verplaatst de machine zich naar de volgende positie. Op deze manier wordt het complete product bewerkt. Om de programma-

kosten te minimaliseren worden alle programma's op een diskette vastgelegd.

De opbouw van de lasermachine is zeer robuust. Laser en manipulatiesysteem zijn op een massief onderstel opgebouwd. Tevens is voor een veilig gebruik van de laser het gehele systeem ingebouwd in een kast. Hierdoor voldoet dit systeem aan de Klasse I veiligheidseisen (te vergelijken met een milliwatt HeNe-laser). Tijdens het boren en snijden wordt de damp afgezogen en elektrostatisch gefilterd. De bewerkingsruimte wordt hier 50 keer per uur afgezogen. Rondom het lasersysteem is een aantal noodknoppen aangebracht waarmee het systeem uitgezet kan worden. Een dubbele beveiliging is voorzien op het moment dat de deur van de bewerkingsruimte geopend wordt, of indien een werkstuk wordt verwisseld. Onze ervaring is dat het verwisselen van de flitslampen en het opnieuw in bedrijf stellen van de machine uitgevoerd moet worden door een ervaren technicus, met voldoende "optisch" inzicht. Voor de bediening is minimaal een MTS-WTB-opleiding nodig om de machine in productie te houden. Goede productieplanning van de kortlopende projecten is een "must", om de bezettingsgraad van de machine op  $\pm 80$  à  $90\%$  te houden. De machine kan in 3 ploegen werken, 24 uur per dag. Om een hoge bezettingsgraad van de machine mogelijk te maken is regelmatig en preventief onderhoud noodzakelijk. Dit om de productiekosten zo laag mogelijk te houden. Op deze kosten zullen we in een volgend hoofdstuk nader ingaan.



Figuur 5

## Kostenaspecten

We zullen hier een kostenvergelijking maken voor het bewerken van een driedimensionaal produkt. Bij het laserboren van gaten in nikkel-cobalt-legeringen van turbineschoepen (zie figuur 6) ondervindt de laser concurrentie van de vonkverspaningstechniek. In het algemeen is het laserproces sneller dan het vonkproces. Men moet wel bedenken dat bij het vonkverspanen vaak meerdere gaten, soms meer dan honderd, tegelijk worden geboord. Vergelijken we de zuivere produktietijd, inclusief de opspantijd, dan is deze nog steeds in het voordeel van de laser; 1:3 tot 1:5 ten opzichte van de vonkverspaning. Vergelijken we de bewerkingskosten voor het boren van 110 gaten in een schoep, tussen een lasermachine en een vonkverspaningsmachine, dan zijn die voor de laserbewerking 30% van de kosten voor vonkverspaning, ondanks de veel hogere investering van een lasermachine. Door het gebruik van een vijfzige machine zijn in het algemeen de gereedschapskosten een factor tien lager dan bij de vonkverspaning.

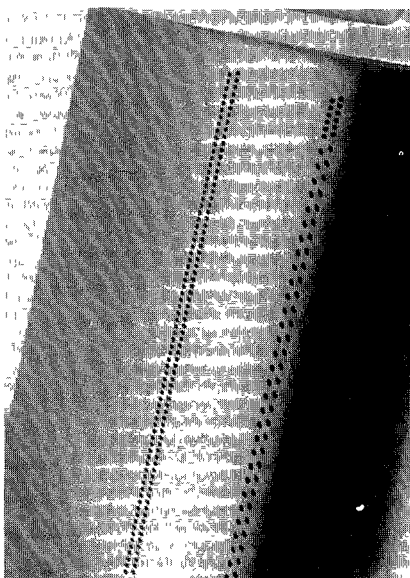
Moeten gaten geboord worden in normale materialen, bijvoorbeeld roestvaststaal, dan moet steeds nagegaan worden of conventioneel boren geen goedkopere oplossing is. Het zal echter ook duidelijk zijn dat een produkt met 30000 gaten ( $\varnothing$  0.25) in 2,5 mm gehard roestvrijstaal (Rockwell C 64) een typische "laserklus" is.

In snijtoepassingen moet de Nd-YAG-laser concurreren met de CO<sub>2</sub>-laser die qua snelheid in het algemeen een factor 4 à 5 sneller is. De investeringen liggen echter globaal een factor 2 à 3 hoger. Kwaliteit, reproduceerbaarheid en metallurgische aspecten moeten hier het voordeel brengen van de ND-YAG-laser (zie figuur 7). Vergeleken met conventioneel frezen of zagen is het laserproces een contactloos proces, waardoor de gereedschapskosten hier vaak gering zijn.

Een andere snijtechniek is het draadvonken. In het algemeen is de lasersnijsnelheid 5 à 10 maal hoger dan de draadvonksnelheid. Daar staat tegenover dat de oppervlakteruwheid bij draadvonken in het algemeen beter is dan bij lasersnijden.

Tevens vindt het draadvonken toepassingen daar waar de laser niet ingezet kan worden (stempels, matrijzen).

Gezien vanuit de lasergebruiker moet bij de kostenberekening op de volgende factoren gelet worden. In het kostenplaatje moet de hoeveelheid research- en ontwikkelingswerk dat verricht moet worden om de procesparameters vast te leggen nagenoeg be-



Figuur 6



Figuur 7

kend zijn. Tevens is de kostprijs afhankelijk van de grootte van de produktie. Goed opgeleide bedieners kunnen daarentegen weer kostenbesparend werken. Ook het al of niet werken in twee- of drieploegendienst heeft invloed op de kostprijs. Een goede produktieplanning kan tot minimalisering van de insteltijden leiden en daardoor kostenbesparend werken. Het is dan ook duidelijk dat een beslissing om een produkt via laser te bewerken alleen genomen kan worden na een goede kostenvergelijking met andere conventionele bewerkings technieken, door zowel de lasergebruiker als de klant.

## Toekomst

De laatste jaren is de groei van het aantal lasermachines "world-wide"

ongeveer 20% à 25%. Zo is bijvoorbeeld het aantal lasersystemen dat ingezet wordt bij het boren van koelgaten in turbineschoepen van 1970 (1), via 1980 (50) naar 1985 (125) toegenomen. De vliegtuigmotorenfabrikanten General Electric, Pratt & Whitney, Rolls Royce, ... accepteren het laserboren steeds meer. Verwacht wordt dat binnen 5 jaar 40% à 50% van de koelgaten in leid- en loopschoepen met lasers geboord zullen worden. Er is een duidelijke trend naar steeds meer en kleinere koelgaten. Tevens zijn nieuwe ontwerpen van de vorm van de koelgaten te verwachten, die niet meer met conventionele technieken (EDM) te maken zijn.

Voor een optimaal gebruik van de laser in dit gebied zal verder fundamenteel onderzoek naar de fysische eigenschappen van de laser noodzakelijk zijn. Er wordt hier gedacht aan vastestof-lasers met een gemiddeld vermogen van 1 kWatt, met een zeer geringe bundel divergentie. Dit laatste is juist noodzakelijk voor toepassing van optische fibers in combinatie met lasers. Problemen bij een optische fiber zijn tot op heden de maximale vermogenstransmissie (300 Watt), de inkoppefficiëncy en de grote bundeldivergentie aan de output. Daarom wordt een fiberlaser-combinatie tot op heden alleen nog maar toegepast bij lassen en in mindere mate bij het snijden.

Verwacht wordt dat in de toekomst een koppeling van CAD-CAM aan de laser steeds vaker zal voorkomen. Ook opname van een lasersysteem in een "flexibel machining center" zal geen vijf jaar meer duren. Men denkt hier onder andere aan de toepassingen in de vliegtuigindustrie, automobieliindustrie en de elektronische industrie.

## Conclusie

In dit artikel is slechts aandacht besteed aan twee bewerkingstechnieken. Lassen, solderen, markeren of grave-ren, trimmen en scriben zijn andere interessante toepassingsgebieden voor de vastestof-laser. Eldim heeft echter gekozen voor één specialisatie (boren) om van daaruit andere bewerkingstechnieken verder te onderzoeken. In het algemeen heeft Eldim de ervaring dat na een gewenningsperiode laser algemeen aanvaard wordt binnen het bedrijf. Toepassingen voor een vastestof-laser zijn legio, maar vergen van de verkopers de nodige creativiteit in het zoeken hiervan. Goede kennis van de interactie tussen laserlicht en materiaal is hierbij vaak een steun in de rug.