

Microbewerking met behulp van lasers

M.M.M. Ezendam

Het bewerken van materialen met behulp van lasers staat momenteel enorm in de belangstelling, en terecht. De ontwikkeling van bestaande en nieuwe typen lasers staat allesbehalve stil. Ontwikkelingen bevinden zich met name op het gebied van hogere vermogens, beter bundelkwaliteit en hogere bewerkingsnauwkeurigheden. In dit artikel wordt ingegaan op de microbewerkingen die realiseerbaar zijn met behulp van lasers.

Het "gereedschap"

Een uitleg van de werking van de laser valt buiten het kader van dit artikel, geïnteresseerden kunnen hier [1] op naslaan; wel van belang is de laserbundel zelf, daar dit het gereedschap is waarmee de bewerkingen uitgevoerd worden.

In figuur 1 is schematisch een laserbundel weergegeven; in dit geval is de bundel rotatiesymmetrisch, doch ook rechthoekige profielen komen voor zoals bij de excimeerlaser. De diameter van de bundel bij het uit treden bedraagt bij industriële lasers enkele millimeters tot enkele centimeters. De diameter van de bundel neemt toe met de afstand vanaf de laser tengevolge van de divergentie. De divergentie wordt veelal uitgedrukt in de halve hoek, figuur 1. Karakteristieke waarden voor de divergentie zijn voor bijvoorbeeld CO₂-lasers 1-5 mrad.

Naast de divergentie van de laserbundel is ook de energieverdeling van wezenlijk belang. Figuur 2 geeft mogelijke energieverdelingen (moden) weer. Een mode wordt aangeduid door middel van een TEM_{m,n} waarde; m geeft het aantal nuldoorgangen in x of r en n het aantal nuldoorgangen in y of φ. Een energieverdeling volgens een Gausse kromme wordt TEM_{0,0} mode genoemd; zie figuur 3.

Een laser met een goede bundelkwaliteit bezit een TEM_{0,0} mode. De kwaliteit van een laserbundel is ook afhankelijk van de divergentie en de diame-

ter van de bundel. Deze kwaliteit geeft men met het zogenaamde Q-getal (of M²-factor = 1/Q) volgens:

$$Q = \frac{\lambda}{\pi \cdot w_0 \cdot \theta_0} \quad (1)$$

Hierin is λ de golflengte van het gemiddete laserlicht, w₀ de kleinste bundeldiameter (= bundeltaile of waist, deze bevindt zich meestal in de laser) en θ₀ de divergentiehoek; zie figuur 4.

Een ideale laserbundel heeft een Q-getal van 1. Tabel 1 geeft voor enkele bekende typen lasers het Q-getal weer. Voor het bewerken van materialen waarbij het materiaal gesmolten of verdampt wordt zijn de energiedichtheden van 10⁶ - 10⁸ J/cm² bij interactietijden van 10⁻⁵ - 10⁻³ s

noodzakelijk. Om deze energiedichtheden te kunnen bereiken is het veelal noodzakelijk de laserbundel te focussen tot een spot met een zo gering mogelijke diameter.

De kleinste haalbare spot volgt uit:

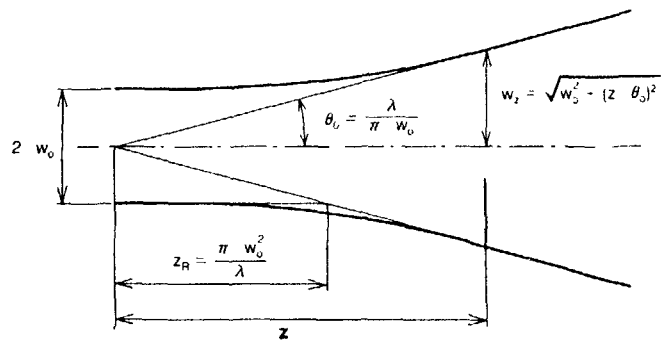
$$\delta_Q = \frac{4}{\pi \cdot Q} \cdot \frac{\lambda \cdot f}{D} \quad (2)$$

Hierin is duidelijk de invloed van de bundelkwaliteit Q te zien.

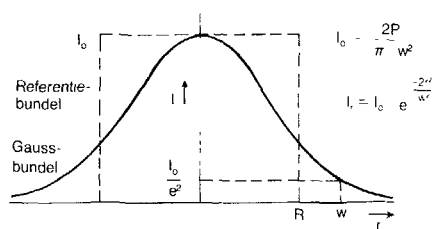
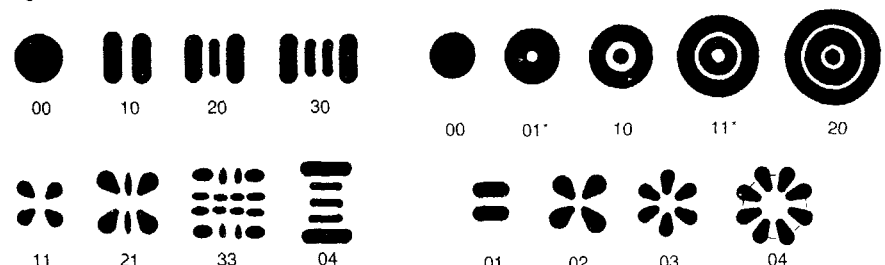
Tengevolge van lensfouten, waaronder sferische aberratie, zal deze minimum spotgrootte nooit bereikt worden. De sferische aberratie bedraagt:

$$\delta_s = K \cdot \frac{D^3}{f^2} \quad (3)$$

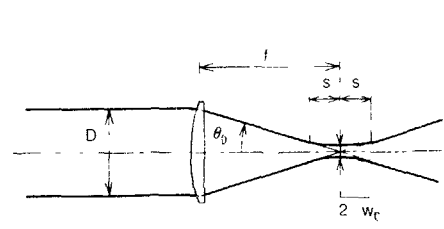
Figuur 1



Figuur 2



Figuur 3



Figuur 4

Microbewerking met behulp van lasers

K is een factor afhankelijk van de lensvorm en het lensmateriaal. Tabel 2 geeft enige waarden van grootheden voor lensmaterialen en vormen die gebruikt worden voor CO₂-lasers. De totale spotgrootte volgt uit:

$$\delta_t = \sqrt{(\delta_Q^2 + \delta_s^2)} \quad (4)$$

In afbeelding 5 is dit verband weergegeven, waaruit duidelijk is dat er een minimum ongelijk nul is.

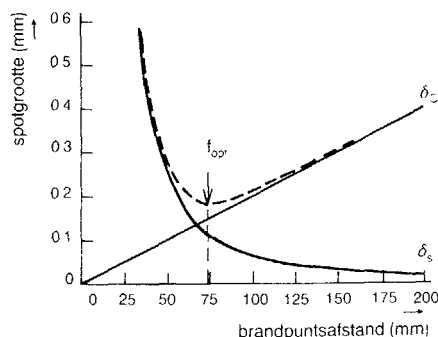
De energie zoals deze afgegeven wordt door een laser kan in de tijd gezien continue of gepulst zijn. Bij gepulste lasers wordt de energiestroom beschreven door middel van de energie in de puls E_p [J], de pulsduur t_{on} [ms] en de puls-herhalingsfrequentie. Het gemiddeld afgegeven vermogen volgt uit P [W] = $f \cdot E_p$ en het vermogen in de puls volgt uit $t_{on} \cdot E_p$.

Lasers voor microbewerking

Microbewerking vraagt in het algemeen weinig vermogen, belangrijker zijn een korte golflengte en een goede bundelkwaliteit. De lasers die momenteel gebruikt worden zijn de CO₂-, Nd:YAG-, excimeer- en koperdamlaser, die in het volgende worden behandeld.

CO₂-lasers

In dit type laser wordt de laserbundel verkregen uit een gasmengsel bestaande uit CO₂, helium en stikstof. Het CO₂-molecule is verantwoordelijk voor de golflengte van 10,6 μm . Vooral bij microbewerkingen in folies wordt de laagvermogen CO₂-laser ingezet. De reden hiervan is dat de golflengte van 10,6 μm door deze materialen goed geabsorbeerd wordt. Deze lasers bezit-



Figuur 5

Lasertype	Golflengte λ [μm]	Vermogen P [W]	$\omega_0 \theta_0$ [mm.mrad]	Bundelkwaliteit Q [-]
Nd:YAG	1,06	100	12,5	0,027
		400	24,1	0,014
CO ₂	10,6	500	4,2	0,8
		2000	8,4	0,4
HeNe	0,63	0,002	0,2	0,98

Tabel 1. Voorbeelden van de bundelkwaliteit van enkele lasers.

Materiaal	Brekingsindex	Meniscuslens	Planconvexlens
Ge	4,00	0,0087	0,0295
GaAs	3,27	0,0114	0,0289
CdTe	3,05	0,0155	0,0285
ZnSe	2,40	0,0187	0,0286
KCl	1,46	0,0778	0,0898

Tabel 2. Lensmaterialen en eigenschappen voor CO₂-lasers ($\lambda = 10,6 \mu\text{m}$).

ten een goede bundelkwaliteit; TEM_{0,0} > 95%, dus de energieverdeling heeft kleine variaties en een divergentie < 2 mrad. Met behulp van speciale optieken kunnen spotgroottes van 50 μm bereikt worden. Een voorbeeld van een toepassing is het boren van gaatjes in spenen.

Nd:YAG-lasers

De laserbundel wordt bij dit type laser verkregen door een staafje Yttrium Aluminium Granaat (YAG), waarin een zeer gering percentage Nd, te belichten met xenon- of krypton-ontladingslampen. Er ontstaat een laserbundel met een golflengte van 1,064 μm . Deze korte golflengte maakt het mogelijk de bundel te focussen tot spotgroottes in de orde van grootte van 10 μm , zie formule (2). Nadeel van de huidige Nd:YAG-lasers is de slechte bundelkwaliteit. Om dergelijke kleine spotgroottes te kunnen behalen is het noodzakelijk om de laser te "fine tu-

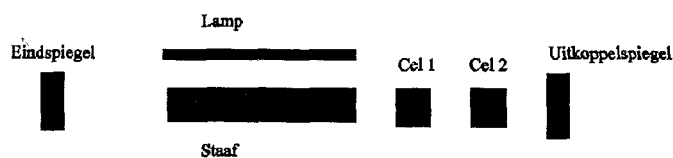
nen", wat echter altijd ten koste gaat van het vermogen.

Om dit te kunnen begrijpen is een klein stukje lasertechnologie benodigd.

In figuur 6 is een resonator van een Nd:YAG-laser geschetst. Te zien zijn de Nd:YAG-staaf, de eindspiegels waarvan één, de uitkoppelspiegel, deels doorlaatbaar is, een diafragma en twee cellen.

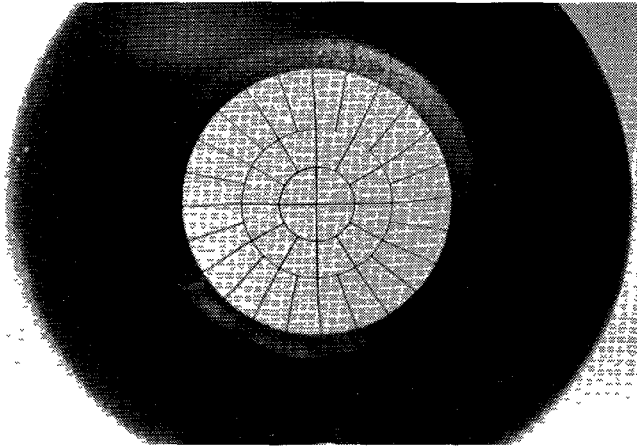
De cellen en het diafragma zijn attributen die gebruikt worden om de Nd:YAG-laser te "fine tunen". Door een diafragma in de resonator te plaatsen kunnen zogenaamde hogere-orde-moden weggefilterd worden zodat een nagenoeg TEM_{0,0} mode overblijft. De energie die zich in de hogere moden bevindt is daarmee verloren. De gatgrootte in het diafragma bepaalt hoeveel van de moden weggefilterd worden.

Naast het plaatsen van een diafragma biedt ook het verlengen van de resonator een verbetering ten aanzien van de bundel kwaliteit. In tegenstelling tot



Figuur 6

Figuur 7



Figuur 8



gaslasers betekent hier een langere resonator wederom vermogens verlies.

Een geheel andere methode om een kleinere spot te realiseren is het plaiten van een niet-lineair kristal in de resonator, waarmee de frequentie van het laserlicht verdubbeld ($0,532 \mu\text{m} = \text{groen}$), verdriedubbeld ($0,355 \mu\text{m}$) of zelfs vervierdubbeld ($0,266 \mu\text{m}$) kan worden. Nadeel van deze methoden is dat zeer veel energie verloren gaat. Toepassingen zijn dan ook slechts daar te vinden waar weinig vermogen en een zeer fijne spot benodigd zijn, zoals bijvoorbeeld bij het graveren van barcode-achtige informatie van $15 \mu\text{m}$ breed in siliciumplakken waarvoor slechts 1 W benodigd is.

Nd:YAG-lasers kunnen zowel continue als gepulst vermogen leveren. Voor boor- en snijtoepassingen worden meestal gepulste lasers gebruikt. De pulsduur dient hiervoor korter te zijn dan $0,5 \text{ ms}$. Voor lastoepassingen is een langere pulsduur van $2,5 - 20 \text{ ms}$ gunstig. Graveren geschiedt meestal met een zogenaamde ge-Q-switch-te continue Nd:YAG-laser. In de resonator is een zogenaamde Q-switch geplaatst, waarmee pulsfrequenties van 1 kHz tot tientallen kHz'en gerealiseerd kunnen worden. De graveersnelheid kan hierdoor zeer hoog zijn. Het spreekt voor zich dat de energie per puls daalt bij toenemende frequenties. Continue lasers worden op dit moment toegepast bij

hoogvermogen ($1 - 2 \text{ kW}$) snijden.

Figuur 7 en figuur 8 geven voorbeelden van produkten die met behulp van een Nd:YAG-laser gerealiseerd zijn. Met behulp van een frequentie verdubbelde Nd:YAG-laser zijn op een chroomglas-masker snedebreedtes van $4 \mu\text{m}$ gerealiseerd.

Excimeerlaser

Dit type laser is sinds 1975 commercieel verkrijgbaar. De eerste tien jaar werd hij voornamelijk ingezet in onderzoekslaboratoria, daarna is de excimeerlaser langzaam bij grote industriële ondernemingen binnen gedrongen. Excimeerlasers zijn gepulste gaslasers, continue bedrijf is niet mogelijk. Als lasergas worden edelgas-halogenen mengsels van Xe/F, Xe/Cl, Kr/F of Ar/F gebruikt. Door een elektrische ontlading ontstaan in de gasbuis instabiele edelgas-halogenen verbindingen - zogenaamde excimeren - die uiteenvallen onder uitzending van ultraviolet licht. In tabel 3 is weergegeven welke golflengtes ontstaan bij gebruik van de diverse gasmengsels.

Pulsenergiën die met behulp van excimeerlasers gerealiseerd kunnen wor-

den liggen tussen 100 mJ en enige Joules. Praktisch gezien worden pulsenergiën tussen 10 en 700 mJ gebruikt. Een haalbare pulsrequentie is 1000 Hz . Het gemiddelde vermogen van excimeerlasers bedraagt $10 - 50 \text{ W}$, doch ook systemen tot 200 W zijn leverbaar. Door de korte pulsduur van $10 - 40 \text{ ns}$ zijn zeer hoge pulsvermogens mogelijk. De korte golflengten maken dat zeer hoge foto-energiën verkregen worden ($E=h.c/\lambda$ met $h = \text{constante van Planck}$, $c = \text{lichtsnelheid}$), 4 eV bij 308 nm tot 6 eV bij 193 nm . Hierdoor ontstaat de mogelijkheid materialen te bewerken door de onderlinge band tussen moleculen te verbreken; men spreekt van ablatie. In tegenstelling tot CO_2 - en Nd:YAG-lasers behoeft het materiaal niet gesmolten of verdampt te worden, waardoor nagenoeg geen thermische belasting optreedt. In tegenstelling tot CO_2 - en Nd:YAG-lasers wordt de laserbundel niet gefocuseerd tot een spot, maar vindt bewerking plaats door een masker op het materiaal te plaatsen of door een masker af te beelden, zie figuur 9. In de praktijk is een afbeelding van $1:4$ voldoende voor bijvoorbeeld het bewerken van polyimide. Het afbeelden van een masker geeft de

Lasermedium	ArF	KrF	XeCl	XeF
Golflengte [nm]	193	248	308	351

Tabel 3. Golflengtes bij diverse excimeren.

Microbewerking met behulp van lasers

hoogste nauwkeurigheden. Door de matige bundelkwaliteit van de excimeerlaser is het moeilijk kleine spotgroottes te halen door de bundel direct te focuseren. TNO [4] heeft experimenten uitgevoerd met behulp van een excimeerlaser waarbij de bundelkwaliteit ongeveer $Q = 0,1$ bedroeg. De minimaal bereikbare spotgrootte bedroeg ongeveer $20 \mu\text{m}$.

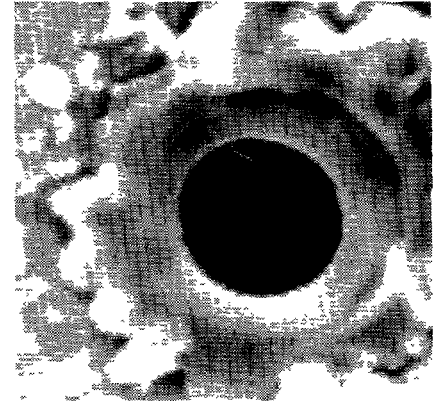
De materiaalafname per laserpuls bedraagt veelal $0,1 - 1 \mu\text{m}$ zodat een zeer nauwkeurig gedefinieerde bewerkingsdiepte realiseerbaar is. Laterale nauwkeurigheden hebben dezelfde orde van grootte.

Toepassingen van excimeerlasers zijn het boren van gaten in kunststoffolies - gatgrootte $10 - 100 \mu\text{m}$, foliedikte $0,5 \text{ mm}$ - het aanbrengen van nauwkeurige graveringen in bijvoorbeeld brillieglazen en als UV-bron voor microlithografie ten behoeve van het maken van chips. Figuur 10 geeft een voorbeeld van de mogelijkheden van een excimeerlaser; het graveren van tekst in een menselijke haar!

Koperdamlaser

De koperdamlaser biedt sinds kort een nieuwe mogelijkheid voor microbewerking met behulp van lasers. De koperdamlaser gebruikt, zoals de naam al aangeeft een koperdamp, verkregen door het verdampen van koperdeeltjes in een neon atmosfeer. De ontstane bundel is zichtbaar, en wel een combinatie van 511 nm (groen) en 578 nm (geel). De korte golflengte maakt dat vele metalen, waaronder goud en koper, deze golflengte beter absorberen dan die van CO_2 - en Nd YAG-lasers. Het blijkt dat voor de meeste metalen de reflectie voor deze golflengte afneemt tot 50% , waar hij voor de CO_2 - en de Nd:YAG-lasers nog 90% bedraagt.

Koperdamlasers produceren een gepulste bundel met pulslengtes van $15 - 60 \text{ ns}$ en puls frequenties van $80 - 20 \text{ kHz}$. Het gemiddeld vermogen is maximaal 100 W . Door de korte golflengte laat de bundel zich focuseren tot een zeer kleine spot (ordegrootte $10 \mu\text{m}$) waardoor energiedichtheden van 100 GW/cm^2 realiseerbaar zijn. Door de hoge energie en de korte pulstijden is



Figuur 11

bewerken met een zeer geringe warmteïnbreng mogelijk. Een voorbeeld hiervan is de warmteïnbloede zone van slechte $0,5 \mu\text{m}$ bij gaten van $30 \mu\text{m}$ diameter, geboord in koper van 6 mm dik. Figuur 11 geeft een voorbeeld van de mogelijkheden van de koperdamlaser. Nadeel van de huidige koperdamlasers is dat ze nogal duur zijn, zelfs in verhouding tot de ook al niet goedkope CO_2 - en Nd:YAG-lasers.

Slot

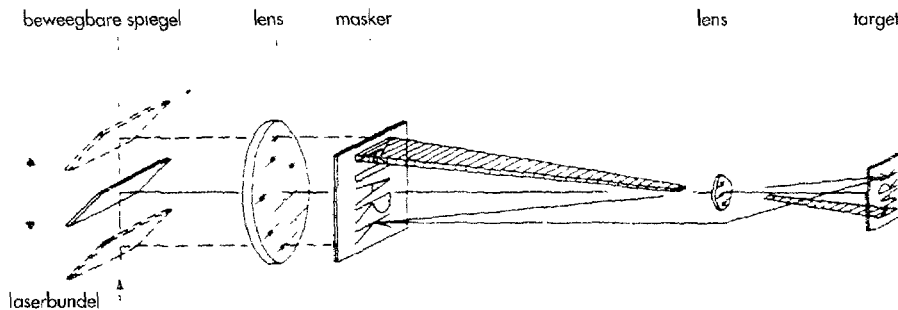
Het bewerken van materialen in het micronbereik neemt op dit moment een grote vlucht. Verwacht wordt dat door het verbeteren van de bundelkwaliteit bij Nd:YAG-, koper- en excimeerlasers de haalbare spotgroottes nog aanzienlijk kleiner zullen worden. Ook het verbeteren van het rendement van de frequentieverdubbelingsmethoden zal bijdragen aan een verdere miniaturisatie. De CO_2 -, Nd:YAG- en excimeerlaser zijn inmiddels goed toepasbaar in industriële omgevingen, de koperdamlaser moet zijn plaats duidelijk nog vinden.

Literatuur

- [1] VM80, Ir J. Meijer, Laserbewerkingen, Uitgave FME, Zoetermeer, december 1988
- [2] BAASEL, Ing. H. Matser, Edisonweg 52, Alblasserdam
- [3] HAAS, J. Dijk, Produkteweg 4, Alphen a/d Rijn
- [4] Dr J.A. Schuurman, Snijden van een akoestisch array met een excimeerlaser, Materialen (1993)2
- [5] Lambda Physik, Optilas, Chr. Huygensweg 17, Alphen a/d Rijn
- [6] MRH Knowles c.a., Oxford lasers, Abingdon Science Park, Barton Lane Abingdon, Oxfordshire OX143YR
- [7] Dr H. Enderit, Excimeerlaser als neue Werkzeuge zur Feinbearbeitung, VDI-berichte nr 1031, 1993

Auteursnoot

Ir M.M.M. Ezendam is werkzaam bij Demcon Twente BV, mechanica, optica, lasers, Universiteit Twente



Figuur 9



Figuur 10