

In dit nummer

Vakblad voor precisietechnologie en fijnmechanische techniek en orgaan van de NVPT. Mikroniek geeft actuele informatie over technische ontwikkelingen op het gebied van mechanica, optica en elektronica. Het blad wordt gelezen door functionarissen die verantwoordelijk zijn voor ontwikkeling en fabricage van geavanceerde fijnmechanische apparatuur voor professioneel gebruik, maar ook van consumentenproducten.

Uitgave:

Twin Design bv
Postbus 317
4100 AH Culemborg
Telefoon: 0345-519525
Fax: 0345-513480
E-mail: mikroniek@twindesign.nl

Uitgever:

Andries Harshagen / Renate Mouton

Abonnementen:

Twin Design bv, Culemborg

Abonnementenkosten:

Nederland: fl. 120,- per jaar ex BTW
Buitenland: fl. 150,- per jaar ex BTW

Hoofredactie

Dirk Scheper
E-mail: info@rbe.nl

Redactiesecretariaat/eindredactie

Mikroniek/ Renate Mouton
Twin Design bv
E-mail: redactie@twindesign.nl

Advertentie-acquisitie:

Waterfront media
Henk van der Brugge
Tel: 06-29574666 of 078-622 7770

Secretariaat NVPT

Parallelweg 30
Postbus 70577
5201 CZ Den Bosch
Tel: 073-6233562
Fax: 073-6441949
E-mail: office@NVPT.nl

Vormgeving en realisatie:

Twin Design bv, Culemborg

Mikroniek verschijnt zes maal per jaar
© Niets van deze uitgave mag overgenomen of vermenigvuldigd worden zonder nadrukkelijke toestemming van de redactie.

ISSN 0026-3699

Coverfoto: Trumpf GmbH & Co., Ditzingen (D)

4 Editorial

5 Een generiek mechanisatieplatform

In dit artikel van ir. Markjan Vermeer wordt een mechanisatieplatform beschreven dat gericht is op assemblage van producten en componenten met een maximale afmeting van 100 mm³.

7 Een flexibele pick-and-place unit

In relatie tot zijn vorige artikel 'Een generiek mechanisatieplatform', beschrijft Markjan Vermeer het ontwerp en de realisatie van een flexibele pick-and-place unit.

10 Gaslagers: ontwerp en berekening

Met de huidige stand van de fabricagetechniek kunnen tegen beperkte kosten gaslagers worden gefabriceerd met zeer dunne luchtfilms. In combinatie met de vele gunstige eigenschappen van gaslagers mag worden verwacht dat deze de komende jaren steeds vaker zullen worden toegepast. In dit artikel van dr.ir. Anton van Beek zullen de mogelijkheden van gaslagers duidelijk naar voren komen.

16 Laserconfiguratie en technologie gaan om

Veelzijdige laserbronnen van verschillende soort en sterkte spelen in toenemende mate een bepalende rol in de hedendaagse industrie. Lasers zijn immers essentiële, hoogst flexibele gereedschappen die gemakkelijk te integreren zijn in productieopstellingen. Zeer uiteenlopende, schijnbaar onmaakbare zaken zijn contactloos te realiseren middels dergelijke geconcentreerde lichtbundels met hoge vermogensdichtheid. Er komt dan ook geen eind aan de stroom innovaties in de vorm van bruikbare laservarianten en economisch-technisch aantrekkelijke toepassingen, gericht op zowel metalen, kunststoffen, hybride materialen en laminaten, als technische kramieken. Ing. Jan Wijers verschaft de lezer middels dit artikel inzicht in al die innovaties.



Andere tijden

In mijn boekenkast staan zes delen van het *Handboek van de Fijnmechanische Techniek*, onder redactie van A. Davidson. Naar rechts worden de delen steeds dunner en deel 3 ontbreekt. Jammer, want het was in de jaren zestig best moedig zo'n serie te starten.

Moet je zo'n boek van bijna veertig jaar oud langzamerhand niet eens weggoien? Ik vind van niet, want nog regelmatig blader ik erin. Veel waarheden van toen gelden immers nog steeds. Het ijzer-koolstofdiagram is in deze nieuwe eeuw nog steeds hetzelfde en de thermische uitzetting van aluminium gaat nooit verloren, om maar eens een paar dwarsstraten te noemen. Toch is er in die veertig jaar wel het een en ander gebeurd, want om op een computer te rekenen moest je toen eerst een ponsband met het programma maken. Als daar dan een fout in zat, kon je opnieuw beginnen met het risico dat er weer nieuwe fouten bij kwamen. Wat een zegen waren toen de losse ponskaarten voor iedere programmaregel.

Bij Philips werd er gewerkt aan het mechaniseren van de montage van printplaten. Met veel geweld kwam er een volledig bestückte plaat uit een rij machines met afmetingen die de totstandkoming van een compleet auto-mobiel deden vermoeden. De transistor was net uitgevonden, maar voor een hifi-versterker moest je beslist nog penthodes toepassen. Van miljoenen functies op een vierkante millimeter droomden zelfs de stoutste elektronica-ontwerpers nog niet.

Toen heette precisietechnologie nog fijnmechanische techniek. Maar is er vandaag de dag in dat vak zoveel veranderd? Ja, want de computer heeft het leven een stuk makkelijker gemaakt. Meetresultaten schrijf je niet meer op een papiertje en je hoeft het gemiddelde en de standaarddeviatie niet meer op je handgeslingerde facitje uit te rekenen. De computer presenteert immers alle mogelijke en onmogelijke statistische resultaten in fraaie kleurendruk. En de bewegingen in het meetapparaat worden met een laserstraal gemeten en door een computer gestuurd.

Of is het antwoord op die vraag toch ontkennend? Nog steeds moet je machineonderdelen draaien, frezen en slijpen. En nog steeds weten we niet precies wat er zich afspeelt daar bij die beitelpunt en slijpkorrel, als spanen zich met moeite losscheuren uit hun ondergrond. Nog steeds moeten mechanismen nauwkeurig bewegen om dichtbeschreven informatiedragers uit te lezen, al heten die nu geen langspeelplaat maar Compact Disc en DVD. Een elektronenmicroscop kan details kleiner dan een nanometer zien, maar toch zijn daarvoor poolschoenen nodig die mechanisch bewerkt zijn met een precisie van een tiende micrometer. Kortom, de precisietechnologie is vandaag de dag springlevend en daarom praten we nu even makkelijk over nanometers als veertig jaar geleden over microns.

Lang leve de precisietechnologie!

Frans Zuurveen

Een generiek mechanisatieplatform

Het ontwerpen en bouwen van machines voor het assembleren van fijnmechanische en elektronische componenten is een specialisme op zichzelf. De klant die de machines gebruikt voor productie vraagt naar steeds hogere productiesnelheden, hogere bewerkingsnauwkeurigheden en lagere productiekosten.

Tegelijkertijd is 'Time To Market', de tijd waarin een eindproduct op de markt wordt gezet, een belangrijke factor geworden. De doorlooptijd van de ontwikkeling van een productiesysteem staat daarmee onder druk.

Naast de korte ontwikkelingstijden van machines wordt tevens steeds meer de nadruk gelegd op flexibiliteit, dat wil zeggen: het kunnen hergebruiken of het kunnen aanpassen van een productiesysteem. Immers, bij relatief kleine productveranderingen zou het gunstig zijn als het nieuwe product gemaakt kan worden met reeds bestaande productiesystemen.

• *Ir. Markjan Vermeer* •

Om de ontwikkeltijd van machines te bekorten kunnen in twee richtingen oplossingen worden gezocht. De eerste richting is het beperken van het aantal alternatieven voor processen en bewerkingen, gevolgd door het vinden van een standaardisatie voor die processen en bewerkingen die bij een zo breed mogelijk scala aan producten kan worden toegepast.

De tweede richting is het opbouwen van een machine uit standardeenheden. Zo'n verzameling functionele eenheden kan het niveau van een mechanisatieplatform bereiken. Het mechanisatieplatform dat hierna wordt beschreven is gericht op assemblage van producten en componenten met een maximale afmeting van 100 mm³.

Het hier beschreven mechanisatieplatform bestaat uit:

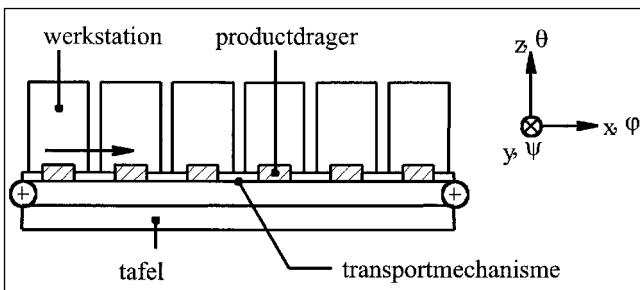
- 1) een tafel;
- 2) taakspecifieke werkstations;
- 3) een transportmechanisme.

Ad 1) De tafel heeft een standaardlengte, in dit geval is gekozen voor 6 maal de 'steek'. De steek geeft de onderlinge afstand tussen twee werkstations weer. Op deze tafel kunnen (op eenvoudige wijze) 6 verschillende werkstations in lijn worden bevestigd. Er is gekozen voor een steek van 120 mm. Dit betekent dat een werkstation een breedte van 120 mm of een veelvoud daarvan zal hebben (figuur 1).

Ad 2) Er is een standaardinterface tussen het werkstation en de tafel. Deze interface definieert de statisch bepaalde

plaats van het werkstation op de tafel. Heeft een werkstation eenmaal deel uitgemaakt van een mechanisatiesysteem, dan is het terugplaatsen van het werkstation in het systeem zeer eenvoudig. Immers, zijn plaats is eenduidig bepaald in termen van 6 coördinaten.

Ad 3) Behalve werkstations draagt de tafel ook een transportmechanisme voor de productdragers. De producten worden op productdragers van het ene werkstation naar het andere getransporteerd. Het transport wordt centraal gerealiseerd. Het transportmechanisme brengt de productdragers slechts in de omgeving van de respectievelijke werkstations. Bij een werkstation aangekomen worden de productdragers overgenomen in een fixeersysteem dat bij het besproken werkstation hoort. Pas dan vindt het nauwkeurig positioneren van een productdrager ten opzichte van een werkstation plaats. Het grote voordeel van dit concept is dat er nauwelijks een nauwkeurigheidseis gesteld hoeft te worden aan de interface tussen het transportmechanisme en de werkstations; immers, elke productdrager wordt individueel in positie gebracht.



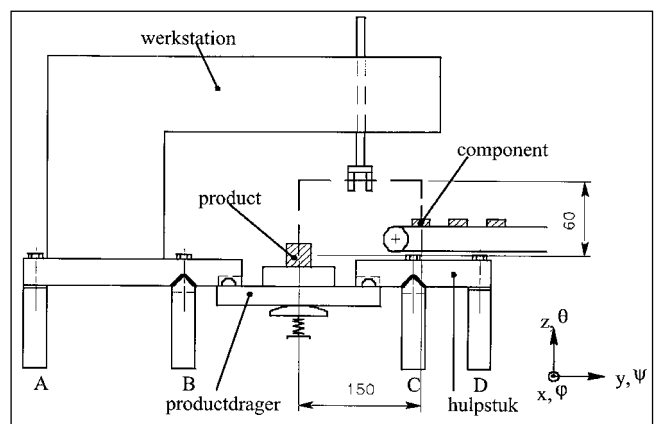
Figuur 1. Opbouw mechanisatieplatform.

Om flexibiliteit te waarborgen, moeten de werkstations op eenvoudige wijze kunnen aangebracht op de tafel. Dit mag niet te veel tijd kosten en ook niet ten koste gaan van de bewerkingsnauwkeurigheid. De opbouw zoals weergegeven in figuur 2 laat een geschikte oplossing zien. De tafel is uitgevoerd als 4 rechtopstaande platen A, B, C en D. Hier bovenop wordt het werkstation bevestigd. Het werkstation rust met twee korte V-groeven op de drager (B) en met één vlakje op de drager (A). Op deze wijze zijn 5 coördinaten vastgelegd. Het enige dat het werkstation dan nog kan, is schuiven in de langsrichting van de tafel (dat wil zeggen in de x-richting van figuur 2. De x-positie van het werkstation wordt nu gedefinieerd door het aanbrengen van een aanslag op de drager (B).

In het mechanische deel van de interface is geen aandrijving gedefinieerd. In dit concept zal elk werkstation zijn

eigen servosystemen hebben. Dit betekent dat in de interface een bussysteem is opgenomen. Een hostcomputer kan met elk werkstation communiceren en zodoende onder andere de synchronisatie bewaken.

Bij het werkstation behoort een hulpstuk (figuur 2) aan de andere zijde van de transportbaan. De plaats van het hulpstuk op de platen C en D wordt middels een dummy-productdrager (hier niet getekend) vastgelegd.



Figuur 2. Doorsnede mechanisatieplatform.

Het werkstation bevat, samen met het hulpstuk, drie V-groeven. Na het transport van de productdragers moeten deze met een zekere nauwkeurigheid ten opzichte van de respectievelijke werkstations hun plaats innemen. Zij worden daarom gefixeerd door ze vanaf de transportbaan omhoog te tillen en aan te drukken, zodanig dat drie halve bollen van een productdrager vallen in drie V-groeven, aangebracht in een werkstation en zijn hulpstuk. Hiermee zijn alle vrijheidsgraden van de productdrager vastgelegd. Dit principe wordt beschreven in V4.6 [1].

Op deze wijze wordt een rechtstreekse relatie tussen de productdrager en het werkstation gelegd. De tafel speelt in deze relatie geen rol. Op deze manier kunnen werkstations in korte tijd worden uitgewisseld en vervangen, zonder daarbij in te leveren op de kwaliteit van de bewerking op het betreffende werkstation.

Literatuur

- [1] Koster, M.P. (1998). *Constructieprincipes voor het nauwkeurig bewegen en positioneren*. Twente University Press, Enschede, ISBN 90 3651 1364.

Een *flexibele* pick-and-place unit

Een van de meest voorkomende handelingen bij het assembleren is het plaatsen van componenten. Als eerste werkstation in het mechanisatieplatform (zie het vorige artikel) is daarom een pick-and-place unit ontworpen en gerealiseerd. Deze pick-and-place unit moet aan een aantal eisen voldoen:

- **hij moet aan de interfacevoorwaarden van het platform voldoen;**
- **hij moet flexibel zijn ten aanzien van zijn bewegingen. Deze moeten namelijk vrij programmeerbaar zijn binnen gedefinieerde uiterste standen.**

• *Ir. Markjan Vermeer* •

M

Met bovenstaande eisen als basis kan een richting in het ontwerpen van een concept worden bepaald. Beginnend bij de aandrijving kan worden gezegd dat luchtcilinders niet geschikt zijn. Zij hebben twee nauwkeurige eindstanden en zijn daarom niet vrij programmeerbaar. Aandrijving via een nokmechanisme is eveneens niet vrij programmeerbaar. De vastgelegde vorm van een nokschijf bepaalt immers op eenduidige wijze de beweging. Servomotoren zijn daarentegen volledig vrij programmeerbaar. Er kan een keuze worden gemaakt uit lineaire servo's of roterende servo's. Aangezien lineaire servo's relatief kostbaar zijn, wordt een concept gezocht met roterende servo's als aandrijving.

Op verschillende manieren kan de rotatiebeweging van een servomotor worden omgezet in een lineaire beweging. Met behulp van spindels wordt de aandrijving, ondanks de goedkopere roterende servomotoren, toch nog kostbaar. Als alternatief kan een tandriem worden toegepast.

De vraag luidt nu of een tandriem voldoende stijfheid kan bieden om met de pick-and-place unit aan de specificaties te kunnen voldoen. De situatie kan worden

ingeschat door de benodigde systeemstijfheid te vergelijken met de stijfheid van een mogelijke tandriem.

De situatie kan worden vergeleken met het verplaatsen van een massa van $m = 3$ kg (bewegende massa) in $t_m = 0,3$ seconde (een deel van de 1 seconde cyclustijd) over een afstand van $h_m = 150$ mm (maximale slag). De massa moet met een nauwkeurigheid van $u_0 = 0,01$ mm de gewenste positie aannemen. Met deze gegevens kan een inschatting worden gemaakt [1].

De relatieve plaatsfout U_0 wordt gedefinieerd door $U_0 = u_0/h_m$. Voor een 3^e-graads bewegingsvoorschrift kan voor de dimensieloze periode τ_m de volgende relatie worden gebruikt, $\tau_m = \sqrt[3]{1,66 U_0}$. Wil de constructie geschikt zijn voor het behalen van de beoogde prestaties, dan moet de constructie stijf genoeg zijn. Dat wil zeggen dat in dit geval de laagste mechanische eigenfrequentie ω_m bij geblokkeerde motor minimaal $\omega_m = 2\pi/(\tau_m t_m)$ [rad s⁻¹] moet bedragen. De benodigde stijfheid c van de tandriem die hiermee overeenkomt, bedraagt dan $c = m \cdot \omega_m^2 = 57 \cdot 10^4$ [N m⁻¹]. Deze stijfheid lijkt goed te bereiken met een tandriemconstructie. Ter indicatie, een halve meter tandriem van het type T5 met een breedte van 30 mm heeft een stijfheid van $5 \cdot 10^5$ [N m⁻¹].

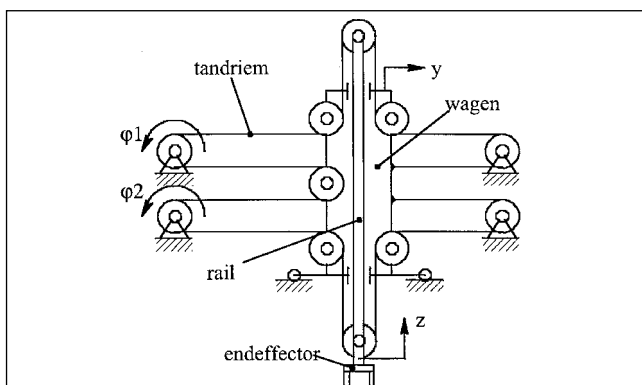
De pick-and-place unit moet voldoen aan de interfacevoorwaarden van het mechanisatieplatform. Dit betekent onder andere dat de unit maximaal 120 mm breed mag zijn. Het plaatsen van componenten vraagt een beweging met twee graden van vrijheid. Het ligt voor de hand twee motoren te kiezen, met aan iedere motor een tandriem. Door deze twee samenstellingen haaks op elkaar te plaatsen kan een pick-and-place beweging worden gecreëerd. Het nadeel is de benodigde breedte voor zo'n opstapeling van bewegingsassen. Het zou mooier zijn de twee bewegingsrichtingen via één tandriem aan te kunnen sturen. Deze mogelijkheid wordt weergegeven door het principe in figuur 1, beschreven in V9.8 [2].

De twee bewegingsrichtingen y en z worden door één tandriem aangedreven. Er zijn twee servomotoren aan de tandriem gekoppeld. Door de motoren tegen elkaar in of met elkaar mee te laten draaien, wordt respectievelijk een beweging in de y-richting of de z-richting gerealiseerd. Met deze manier van aandrijven kan elk punt in het werkvlak via elk gewenst pad worden bereikt. Het is een vrij programmeerbaar systeem, zoals ook wordt geïllustreerd door de kinematische overdrachtfunctie tussen de motorrotaties (φ_1, φ_2) en de endeffector coördinaten (y, z). De endeffector die de interface vormt tussen het werkstation en het product wordt hier uitgevoerd als grijper.

$$\begin{bmatrix} y \\ z \end{bmatrix} = r \cdot \begin{bmatrix} +\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{4} & -\frac{1}{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix}$$

Mechanische constructie

Het prototype kan een slag maken van 150 mm in de y-richting en 60 mm in de z-richting. De cyclustijd bedraagt 1 seconde. De tandriem is het bepalende onderdeel voor de systeemstijfheid. In het prototype is een tandriem van het



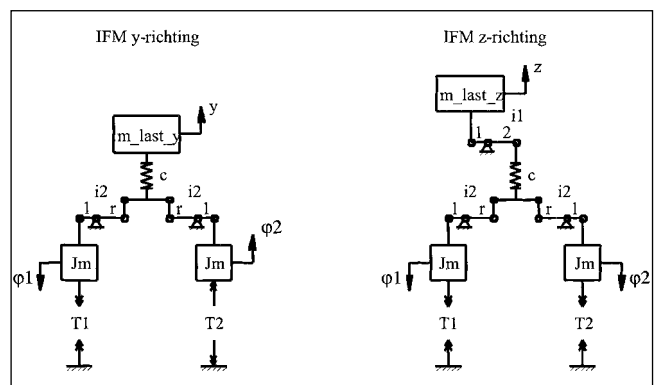
Figuur 1. Principe pick-and-place unit.

type T5 met een breedte van 30 mm toegepast. Met behulp van een Ideaal Fysisch Model (IFM) kan het dynamisch gedrag van de constructie worden berekend. Het IFM is voor de twee bewegingsrichtingen verschillend, zie figuur 2. Als de endeffector op de minst gunstige positie staat, wordt voor de systeemstijfheid in de y- en z-richting, respectievelijk $3,4 \cdot 10^6$ [N m⁻¹] en $3,2 \cdot 10^6$ [N m⁻¹] gevonden. Hieruit blijkt dat met een eenvoudige tandriem toch een systeem met een hoge stijfheid kan worden ontworpen.

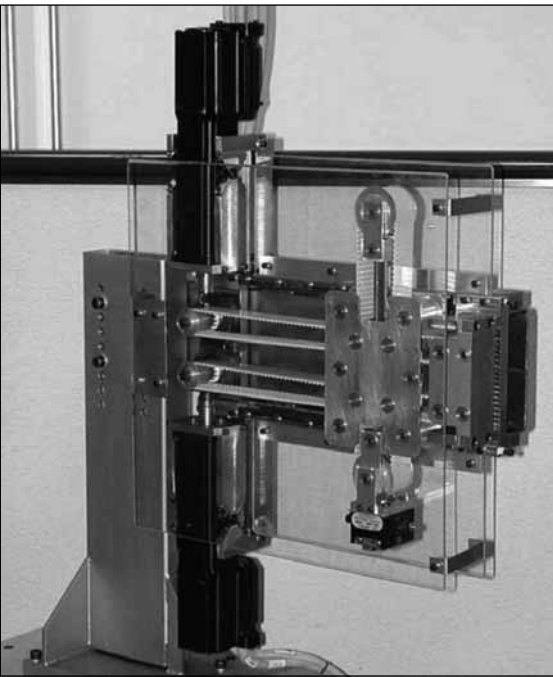
Figuur 3 toont het prototype van de overzetter. Om in het optimaal werkgebied van de motoren te komen is er een haakse tandwieloverbrenging van 1:3 gekozen. De massaverhouding α kan worden gedefinieerd als de massa aan de motorzijde van de overbrenging ten opzichte van de totale massa. Bij een massaverhouding van $\alpha=0,5$ (inertial match) leidt het beschikbare motor-koppel tot maximale versnelling [1]. Uit het IFM en de kinematische overdrachtsfunctie blijken voor de y- en z-richting verschillende overbrengingen te gelden. Voor de y- en z-richting wordt een massaverhouding gevonden van respectievelijk $\alpha_y=0,52$ en $\alpha_z=0,79$.

Om speling te vermijden worden de motoren verend opgehangen met aan weerskanten van de motor een kruisveerscharnier, zie V3.7 [2]. Een lichte veer houdt de tanden spelingvrij voorgespannen. De voorspanning bedraagt net genoeg om bij maximaal koppel de tanden precies in elkaar gedrukt te houden.

Als rechtgeleiding in de z-richting is een kogelomloopwagen met rail gebruikt. Twee kogelomloopeenheden maken deel uit van de wagen. De rail aan boord van de wagen kan vrij bewegen in de z-richting. Aan de rail worden de bovenste en onderste tandriemschijven bevestigd. De rail is op deze wijze de drager van de endeffector.



Figuur 2. Ideaal Fysisch Model Pick-and-place unit.



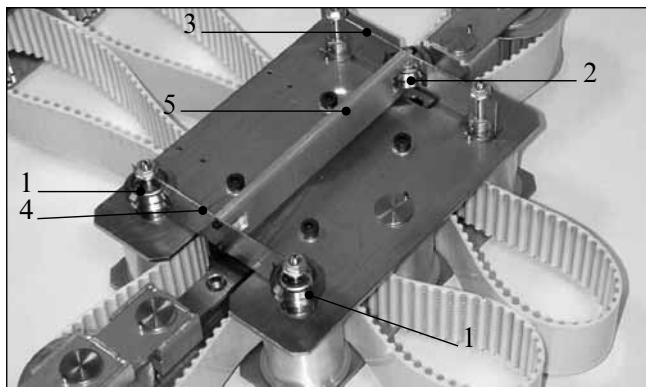
Figuur 3. Prototype Pick-and-place unit.

Bij de y-geleiding van de wagen is gekozen voor een loopwielconstructie met drie loopwielen, zie figuur 4. De twee onderste loopwielen (1) zijn rechtstreeks op de

assen bevestigd waarop ook de twee spanrollen zitten. Het derde loopwiel (2) is verend opgehangen. Door het hart van de onderste twee assen van de wagen is een bladveer geschoven (4). Ditzelfde is gedaan bij de bovenste twee assen (3). De twee bladveren zijn onderling verbonden door een verticaal geplaatste balk (5) in het midden. Het bovenste loopwiel (2), bevestigd aan de bovenkant van balk, heeft nu slechts één graad van vrijheid waarin beweging mogelijk is, namelijk in de langsrichting van balk (5). De onderste en bovenste loopwielen worden onder voorspanning tussen twee horizontale, parallel liggende rails op het frame geplaatst. De voorspanning geleverd door de bladveren zorgt ervoor dat in alle mogelijke belastingssituaties de twee onderste loopwielen op de rail blijven gedrukt. De stijfheid wordt dan bepaald door de contactstijfheid van de onderste loopwielen op de rail. Deze zeer goedkope constructie levert een stijve en lichtlopende rechtgeleiding.

Prestaties

De metingen die zijn verricht aan het prototype bewijzen de mogelijkheden van de pick-and-place unit. De gemeten herhaalnauwkeurigheid heeft een waarde van $\pm 3 \mu\text{m}$. Deze prestatie is beter dan de voorspelde $\pm 0,01 \text{ mm}$ nauwkeurigheid.



Figuur 4. Achterzijde wagen.

De spelingvrije tandwieloverbrenging blijkt zeer gunstig voor wat betreft de nauwkeurigheid. Of de overbrenging ook aan duurzaamheid voldoet, zou verder moeten worden onderzocht.

Toekomstplannen

Aan het prototype zijn verschillende metingen verricht. De meetresultaten hebben er mede toe geleid dat de pick-and-place unit inmiddels aan een redesign is onderworpen. Bij het redesign zal met name gekeken worden naar de duurzaamheid en de betrouwbaarheid van de unit. Ook wordt er gekeken naar de mogelijkheden voor het vergroten van de slag naar $400 \times 80 \text{ mm}$. Het wachten is op een geschikt project om ook het mechanisatieplatform toe te passen. Naarmate het platform vaker wordt toegepast, zal het gunstig zijn om voor andere bewerkingsprocessen ook een standaardunit te ontwerpen. Op deze manier kan in steeds kortere tijd de basis van een machine worden neergezet. De ontwikkelingstijd van een totale mechanisatielijns wordt dan voornamelijk bepaald door de ontwikkelingstijd van sterk productspecifieke bewerkingen.

Verantwoording

Het resultaat van het project, dat een afstudeerproject was van ir. Markjan Vermeer, wordt neergezet door een samenspel van wetenschap en praktijk. Binnen de muren van het bedrijf IMS (Integrated Mechanization Solutions B.V.) is het project uitgevoerd. IMS, dat hightech speciaal machines ontwikkelt en bouwt, was een inspirerende omgeving met een rijke ervaring op het gebied van snelle en nauwkeurige bewerkingen. In het bijzonder heeft de coachende rol van mededirecteur ir. C.G. Huiberts bijgedragen aan het project. Vanuit de Universiteit Twente heeft prof.dr.ir. M.P. Koster, tot september 2001 deeltijdhoogleraar bij de vakgroep Werktuigbouwkundige Automatisering, het gehele project op zeer constructieve wijze ondersteund.

Literatuur

- [1] Koster, M.P., W.T.C. van Leunen en T.J.A. de Vries (1998), 'Mechatronica', Collegedictaat 124151, Universiteit Twente, Enschede.
- [2] Koster, M.P. (1998), *Constructieprincipes voor het nauwkeurig bewegen en positioneren*, Twente University Press, Enschede, ISBN 90 3651 1364.

Gaslagers: ontwerp

Met de huidige stand van de fabricagetechniek kunnen tegen beperkte kosten gaslagers worden gefabriceerd met zeer dunne luchtfilms. In combinatie met de vele gunstige eigenschappen van gaslagers mag worden verwacht dat deze de komende jaren steeds vaker zullen worden toegepast, ook in minder hightech-toepassingen. Aan de hand van de beschrijving van het ontwerp en de berekening van de in dit artikel beschreven gaslagers zullen de mogelijkheden van gaslagers duidelijk naar voren komen.

• *Dr.ir. A. van Beek TU Delft, Werktuigonderdelen en Tribotechniek* •

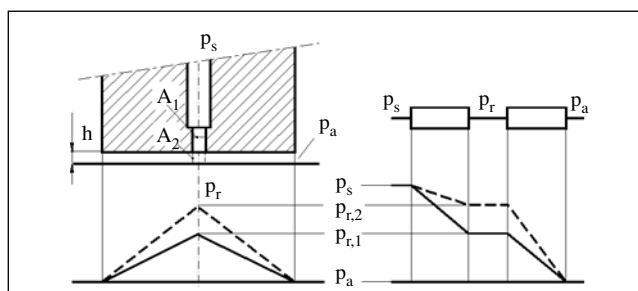
Het meest bekende voordeel van gaslagers is het ontbreken van contact waardoor er geen wrijving en geen slijtage optreedt. De levensduur van gaslagers is hierdoor onbeperkt en volledig onderhoudsvrij. In principe worden gaslagers gesmeerd met lucht waardoor vervuiling van de omgeving door smeermiddelen als olie en vet of slijtagegedeeltes niet voorkomt. Extreme omstandigheden als hoge temperaturen zijn geen enkel probleem. Met een zeer dunne luchtfilm wordt nog nauwelijks lucht verbruikt, en is het vrijkomen van verbruikte lucht niet of nauwelijks hoorbaar. Met gaslagers kunnen uiterst nauwkeurige bewegingen worden gerealiseerd doordat stick-slip ontbreekt, er geen vrije lagerspeling bestaat, een hoge stijfheid te realiseren is en geen mechanische trillingen worden opgewekt. Verder zijn zeer hoge bewegingssnelheden mogelijk door het ontbreken van rollichamen of warmteontwikkeling.

Na deze indrukwekkende lijst van voordelen wordt misschien een lijst met nadelen verwacht. De nadelen zijn echter zeer beperkt en liggen meer in het vlak van: anders dan het selecteren van kogellagers moeten gaslagers in het algemeen worden ontworpen en geoptimaliseerd

voor specifieke toepassingen. Hierbij worden hoge eisen gesteld aan de fundamentele kennis en creativiteit van de constructeur. In dit artikel zal deze beperking al voor een groot deel worden weggenomen.

Principe en werking van gaslagers

Bij de meeste gaslagers wordt perslucht via een zogenaamde voorweerstand tussen de te scheiden oppervlakken geperst, waarna dit aan de omtrek van het lager vrij komt (figuur 1).



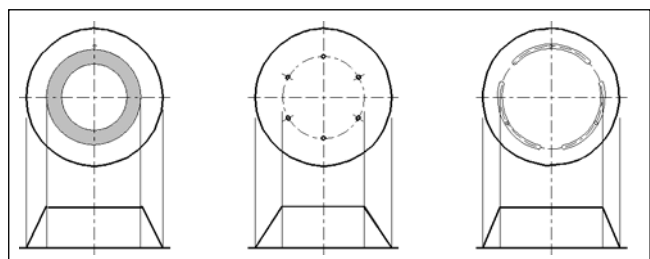
Figuur 1. Filmdruk bij twee verschillende belastingen.

en berekening

De gasdruk valt over de voorweerstand (Eng. restrictor) af van de toevoerdruk p_s (Eng. supply pressure) tot de druk na de voorweerstand p_r . Vervolgens valt de druk over de dunne film die gevormd is tussen de oppervlakken af tot de omgevingsdruk p_a (Eng. ambient pressure). Als gevolg van een toename in de belasting zullen de oppervlakken naar elkaar toe bewegen. Hierdoor neemt de stromingsweerstand door de dunne film toe, het debiet neemt af. Over de voorweerstand, gevormd door een stromingsweerstand zal de drukval afnemen. De filmdruk kan hierdoor het evenwicht met de nieuwe belasting herstellen (stippellijn in figuur 1).

De meest voorkomende voorweerstand worden gevormd door een viskeuze voorweerstand gevormd door een poreus materiaal, of door een traagheidsvoorweerstand gevormd door een kort gaatje (Eng. orifice). Bij een traagheidsvoorweerstand (figuur 1) wordt nog onderscheid gemaakt tussen een vaste traagheidsvoorweerstand waarbij oppervlak A_1 bepalend is voor de doorstroming en een inherente traagheidsvoorweerstand waarbij oppervlak A_2 bepalend is.

Bij een inherente traagheidsvoorweerstand is zowel de filmweerstand als de voorweerstand afhankelijk van de filmdikte (ongunstig). Immers, oppervlak A_2 is afhankelijk van de filmdikte. Doordat de filmweerstand evenredig is met de filmhoogte h^3 , terwijl de voorweerstand evenredig is met h , zal bij een kleinere filmdikte de filmweerstand toch toenemen ten aanzien van de voorweerstand. Echter, door de minder gunstige filmdikteafhankelijkheid van de inherente voorweerstand is de stijfheid die wordt verkregen circa 30% lager dan met de andere voorwestanden. Bij de vaste traagheidsvoorweerstand worden meerdere gaatjes aan het oppervlak veelal verbonden door sleufjes (figuur 2 rechts). Traagheidsvoorwestanden, zowel de

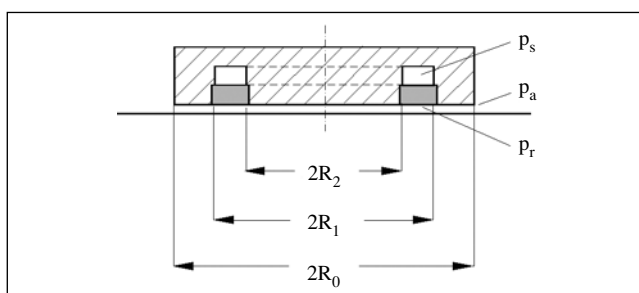


Figuur 2. Poreuze voorweerstand, inherente traagheidsweerstand, vaste traagheidsweerstand.

vaste als de inherente voorwestanden, komen door de constructieve eenvoud het meest voor.

Berekening axiaal gaslager met poreuze voorweerstand

In figuur 3 is een axiaal gaslager weergegeven, bestaande uit een glad oppervlak waarvan een ringvormig gedeelte vervaardigd is uit een poreus materiaal. Via dit poreus materiaal wordt perslucht tussen de oppervlakken geperst. Hierbij worden de oppervlakken uit elkaar gedrukt waardoor een dunne luchtfilm ontstaat.



Figuur 3. Axiaal gaslager met poreuze voorweerstand.

De toevoerdruk p_s valt door de stromingsweerstand van het poreus materiaal af tot de filmdruk p_r . Voor de viskeuze massastroom door poreuze materialen geldt de empirische relatie 'wet van d'Arcy' [lit.1].

$$M = \frac{k_p A_p}{2s} \frac{p_s^2 - p_r^2}{\eta RT} \quad (1)$$

Hierin is A het poreus oppervlak, s de dikte en k_p de permeabiliteit of doorlaatbaarheid van het poreus oppervlak. De filmdruk valt vervolgens, afhankelijk van de stromingsweerstand van de film af tot de omgevingsdruk p_a . Voor een radiale stroming door een lange dunne parallelle film geldt [lit.1]:

$$M = \frac{\pi h^3}{12 \ln(r_0/r_1)} \frac{p_r^2 - p_a^2}{\eta RT} \quad (2)$$

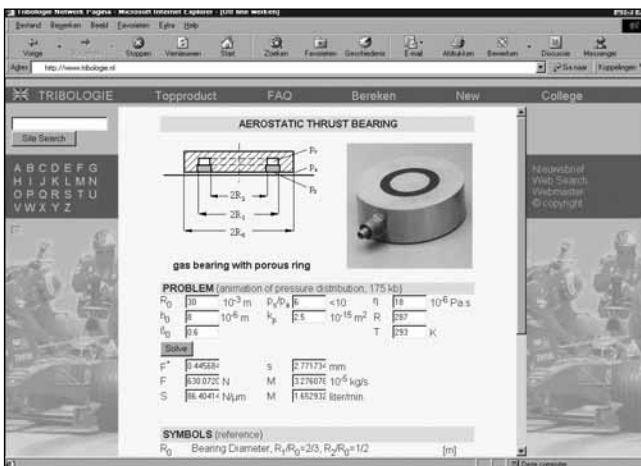
Om de drukverdeling in de film te berekenen wordt de stroming door de voorweerstand gelijkgesteld aan die

door de film. Uit de vergelijking die dan wordt verkregen wordt vervolgens de druk p_r na de voorweerstand opgelost.

In de film ter plaatse van het centrale gedeelte van het oppervlak vindt geen stroming plaats, waardoor daar een constante druk p_r heerst (figuur 2). De belasting die evenwicht maakt met de drukverdeling volgt uit de som van de druk op het centrale gedeelte en het ringvormig oppervlak. Uit het oppervlak onder de curve van de drukverdeling volgt voor de belasting die evenwicht maakt met de drukverdeling, als benadering:

$$F = A_e(p_r - p_a) \quad A_e = \pi \left(\frac{R_0 + R_1}{2} \right)^2 \quad (3)$$

Hierin is A_e het zogenaamde effectief oppervlak. Om de grootte van een willekeurig axiaal gaslager te bepalen kan als vuistregel uitgegaan worden van $F/A=0.3(p_s-p_a)$. Deze vuistregel is gebaseerd op een praktische waarde van de drukverhouding $\beta=(p_r - p_a)/(p_s - p_a)=0.6$ en een effectief oppervlak van circa 50%. Voor een meer nauwkeurige berekening wordt verwezen naar een eenvoudig programmaatje dat zonder installeren kan worden uitgevoerd. Dit programma is te vinden op www.tribologie.nl onder gaslagers (figuur 4).



Figuur 4. Een van de gaslagerprogramma's beschikbaar via www.tribologie.nl.

Wanneer de belasting toeneemt zal de filmdikte kleiner worden waardoor ook de stromingsweerstand en de drukval over de film toeneemt. Hierdoor neemt de filmdruk p_r toe tot de maximale waarde p_s . Dit betekent dat de maximale belastbaarheid, waarbij voor het eerst

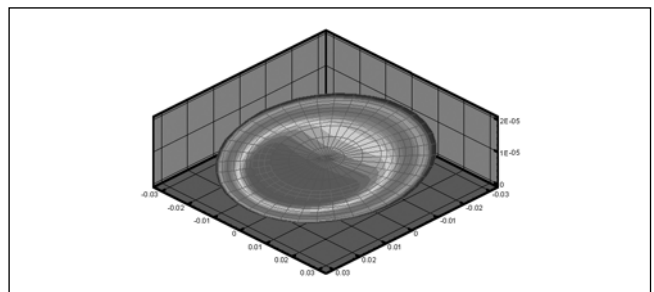
Voorbeeld 1: Ontwerp en berekening axiaal gaslager met poreuze voorweerstand:

Bereken van een axiaal gaslager de benodigde diameter, de grootte van het poreus ringvormig oppervlak (R_0) en het debiet wanneer gegeven is:

- $F = 600 \text{ N}$
- $R_1/R_0 = 2/3$
- $R_2/R_0 = 1/2$
- $p_s/p_a = 6$
- $p_a = 10^5 \text{ Pa}$
- $\beta = 0.6$
- $h = 8 \cdot 10^{-6} \text{ m}$
- $k_p = 2.5 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
- $\eta = 18 \cdot 10^{-6} \text{ Pa s}$
- $R = 287 \text{ m}^2/(\text{s}^2\text{K})$
- $T = 293 \text{ K}$

De draagkracht kan dan worden benaderd door: $F=\pi((R_0+R_1)/2)^2(p_r - p_a)$. Hieruit volgt de benodigde diameter van $2R_0=60 \text{ mm}$. Gekozen wordt voor $R_0=30 \text{ mm}$. Het debiet volgt uit verg.(2), $M=3.3 \cdot 10^{-5} \text{ kg/s}$, omgerekend met de gaswet $PV=MRT$ levert dit een debiet van 1.65 liter/min. Na gelijkstellen van het debiet door het poreus oppervlak aan het radiaal debiet door de buitenring, kan de dikte van het poreus oppervlak s worden berekend, $s=2.77 \text{ mm}$.

Uit de berekening met de exacte drukverdeling volgt $F(h=8 \mu\text{m})=630 \text{ N}$ en $F(h=8.85 \mu\text{m})=600 \text{ N}$. De filmhoogte verkregen met de benaderingsformule blijkt 10% groter dan met de meer exacte berekening!



Figuur 5. Drukverdeling bij scheefstelling.

mechanisch contact ontstaat ($p_r = p_s$) een factor 1/0.6 hoger ligt. De maximale belastbaarheid zal slechts gevonden worden bij een perfecte vlakheid en uitlijning. In figuur 5 is de drukverdeling gegeven die ontstaat wanneer het lager excentrisch wordt belast. De drukverdeling

past zich door scheefstelling automatisch aan waardoor opnieuw evenwicht ontstaat.

Berekening axiaal gaslager met traagheidsvoorweerstand

Voor de massaflow door een traagheidsvoorweerstand geldt [lit.1]:

$$M = C_D A p_s \sqrt{\frac{2\kappa}{(\kappa - 1)RT} \left[\left(\frac{p_r}{p_s}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_r}{p_s}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} \left(\frac{p_r}{p_s}\right)_{krit} > \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa+1}}$$

Hierin is A het oppervlak A_1 voor de vaste traagheidsvoorweerstand of A_2 voor de inherente traagheidsvoorweerstand, C_D is de insnoeringscoëfficiënt en κ de isentropexponent.

De berekening van het gaslager met traagheidsvoorweerstand verloopt gelijk aan de eerder beschreven berekening van het lager met poreuze voorweerstand, behalve dat voor het debiet door de voorweerstand een andere relatie geldt.

Voorbeeld 2: Ontwerp en berekening axiaal gaslager met traagheidsvoorweerstand.

Beschouw het axiaalager beschreven in voorbeeld 1, echter uitgevoerd met drie vaste traagheidsvoorweerden of zes inherente voorweerden als weergegeven in figuur 2.

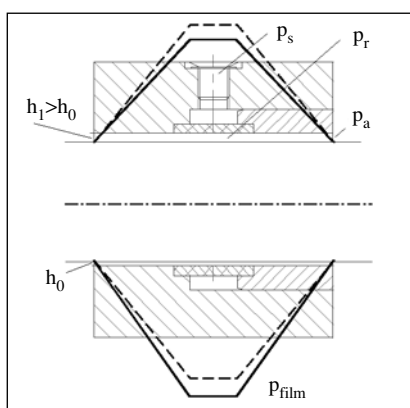
De draagkracht en het debiet zijn onafhankelijk van het type voorweerstand en kunnen dus overgenomen worden uit het voorgaande voorbeeld. Na gelijkstellen van het radiaaldebiet door de buitenring aan het debiet door de voorweerden kan de diameter d van de gaatjes worden berekend.

Met $\kappa=1.4$ voor lucht, $C_D=0.9$ voor $d/l=2$ [lit.1] en 3 vaste traagheidsvoorweerden volgt voor de diameter van de gaatjes, $d=0.073$ mm. Met 6 inherente traagheidsvoorweerden volgt voor de diameter van de gaatjes $d=0.084$ mm. Met dergelijke kleine gaatjes is de kans op verstopping groot. Er zal voor een grotere filmdikte gekozen moeten worden waardoor een eveneens groter debiet ontstaat. Hier blijkt direct de beperking van traagheidsvoorweerden bij zeer dunne luchtfilms.

Ontwerp en berekening radiaal gaslager

De werking van het radiaal gaslager lijkt op een dubbel uitgevoerd axiaal gaslager. De persluchtdruk valt weer af via het poreus oppervlak en de dunne luchtfilm tot de omge-

vingsdruk. Wanneer de as onder belasting vanuit de concentrische positie excentrisch wordt gedrukt, dan neemt de stromingsweerstand van de luchtfilm ter plaatse van de minimale filmdikte toe. Dit resulteert lokaal in een toename van de drukval over de luchtfilm en dus een afname van de drukval over het poreus oppervlak. Aan de andere zijde van de as gebeurt dit net andersom. Er ontstaat een drukverdeling over de as als weergegeven in figuur 6.



Figuur 6. Drukverdeling bij excentrische aspositie.

Bij een concentrische aspositie is de drukverdeling rondom de as gelijk (gestippelde curve). Deze positie zal slechts in onbelaste toestand voorkomen. Wanneer de as uit het midden wordt gedrukt, dan stelt de drukverdeling zich zo in dat er een kracht ontstaat, tegengesteld gericht aan de uitwijking. De as wordt teruggedrukt naar de concentrische positie. Het quotiënt van de kracht en de uitwijking ten gevolge van deze kracht wordt de stijfheid genoemd. Een hoge stijfheid heeft een relatief kleine verplaatsing tot gevolg.

Een voorweerstand als het poreus oppervlak blijkt nodig om de drukverdeling rond de as afhankelijk te maken van de uitwijking. Zonder voorweerstand zou de drukverdeling rond de as altijd overal gelijk zijn waardoor deze niet gecentreerd zou blijven. Om de afmetingen van de voorweerstand te berekenen wordt in concentrische positie de stroming door de voorweerstand gelijkgesteld aan die door de film. Voor een longitudinale stroming door een lange dunne parallelle film geldt [lit.1]:

$$M = \frac{h^3 B}{24 L \eta RT} (p_r^2 - p_a^2) \quad (5)$$

Om de benodigde grootte van een radiaal gaslager in te schatten kan gebruik gemaakt worden van de vuistformule $F = 0.25D^2(P_s - P_a)$. De waarde 0.25 is gebaseerd op

een optimale drukverhouding $\beta=0.5$, een lagerbreedte $B=D$ en een belasting F waarbij de uitwijking van de as zo groot als de halve lagerspleet bij concentrische aspositie. Voor andere lagerbreedtes wordt verwezen naar lit.1 of het programmaatje voor radiale gaslagers dat te vinden is op www.tribologie.nl onder gaslagers.

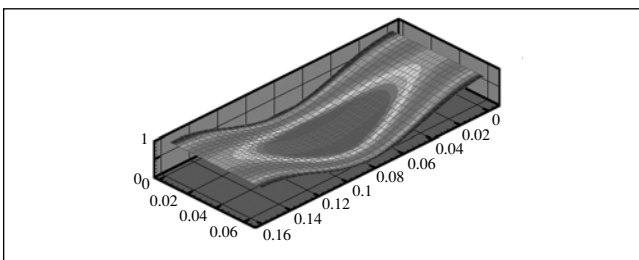
Omdat het luchtverbruik evenredig is met de lagerspleet tot de derde macht wordt deze zo klein als fabricage-

Voorbeeld 3: Ontwerp en berekening radiaal gaslager met poreuze voorweerstand:

Bereken van een radiaal gaslager met viskeuze voorweerstand (figuur 6) de afmetingen van de voorweerstand, het debiet en de draagkracht. Gegeven is:

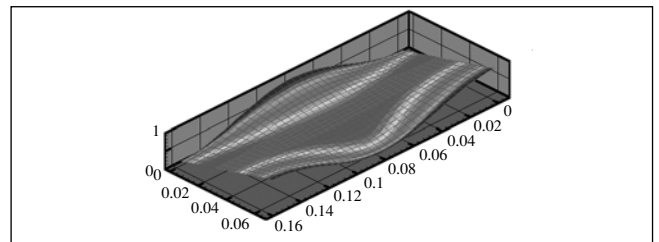
- $D = 50 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
- $L_p = B/10$
- $\Delta R = 10 \cdot 10^{-6} \text{ m}$
- $B/D = 1$
- $p_s/p_a = 6$
- $p_a = 10^5 \text{ Pa}$
- $\beta = 0.5$
- $\varepsilon_{max} = 0.5$
- $F^* = 0.247$
- $k_p = 2.5 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
- $\eta = 18 \cdot 10^{-6} \text{ Pa s}$
- $R = 287 \text{ m}^2/(\text{s}^2\text{K})$
- $T = 293 \text{ K}$

Gelijkstellen van het debiet door het poreus oppervlak aan het debiet door de parallelle film levert een vergelijking met als enige onbekende de dikte van het poreus oppervlak s die nu kan worden berekend, $s=3.6 \text{ mm}$. Het debiet volgt nu uit verg.(1) of (5), $M=4.3 \cdot 10^{-5} \text{ kg/s}$, omgerekend met de gaswet $PV=MRT$ levert dit een debiet van 2.2 liter/min. Met de vuistformule voor F volgt voor de draagkracht $F=310 \text{ N}$.



Figuur 7. Drukverdeling radiaal gaslager bij excentrische aspositie.

technisch haalbaar is gemaakt. Verder moet rekening gehouden worden met stofdeeltjes en maatveranderingen die kunnen optreden door bijvoorbeeld temperatuurverschillen. Als vuistregel kan voor de lagerspleet worden uitgegaan van $\Delta R=1/2000 R_{as}$. Dit is half zo groot als bij zelfwerkende oliegesmeerde lagers gangbaar is.



Figuur 8. Drukverdeling radiaal gaslager bij scheefstelling.

Wrijvingsloze perslucht cilinder

Conventioneel uitgevoerde perslucht cilinders met afdichtingen om de zuiger en om de as komen vaak met een schok in beweging. Dit is het gevolg van een hoge statische wrijving tussen de afdichting en de cilinderwand. Doordat de zuiger al een zekere tijd stil staat is het smeermiddel dat zich mogelijk op het oppervlak bevindt volledig uit het contact weggedrukt. Er is sprake van een zogenaamd droog contact met een hoge wrijving. Wanneer de zuiger in beweging komt kan het droge contact overgaan in een grensgesmeerd contact waarbij de wrijving lager is. Met het terugvallen van de wrijving zal de gecompriemde lucht achter de zuiger expanderen waardoor de zuiger met een schok in beweging komt. Wanneer de perslucht cilinder zonder beweging of hooguit met een kleine beweging een constante kracht moet blijven uitoefenen, dan is dit door de statische wrijving of stick-slip niet mogelijk. Een variatie op de kracht ter grootte van 10 tot 20% van de toevoerdruk is niet ondenkbaar.

Een perslucht cilinder is een goed voorbeeld waarbij perslucht toch al aanwezig is en dus tevens kan worden benut



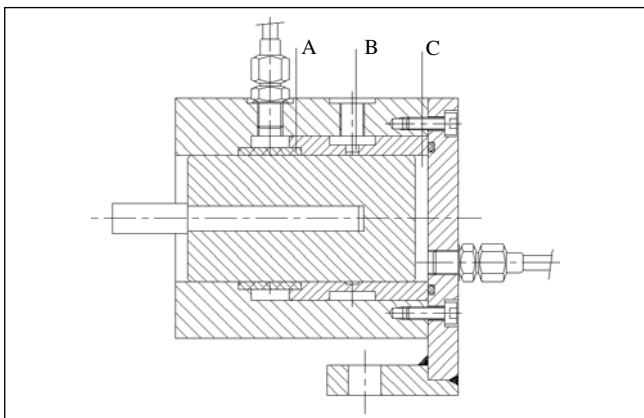
Figuur 9. Luchtgesmeerde, wrijvingsloos werkende perslucht cilinder, zuigerdiameter 50 mm, toevoerdruk 6 baro, radiale belasting tot 500 N, lagerspleet 10 μm , luchtverbruik gaslager 5 liter/min. Totaal luchtverbruik perslucht cilinder bij maximale aandrukkraft van 1200N, 10 liter/min.

Conventioneel uitgevoerde persluchtcilinders komen vaak met een schok in beweging

om de interne wrijving te elimineren. In figuur 9 is een afbeelding gegeven van een persluchtcilinder die door luchtsmering volledig wrijvingsloos werkt.

De wijze waarop de zuiger in de persluchtcilinder kan worden gecentreerd door perslucht is niet anders dan bij een radiaal gaslager. In de uitvoering zoals toegepast bij de persluchtcilinder wordt de perslucht via een poreus oppervlak (A) tussen de zuiger en de cilinder geperst (figuur 10).

De drukzijde rechts van zuiger (C), waarmee de effectieve zuigerkracht wordt aangebracht, is gescheiden van het gaslager door een ringvormige uitsparing in het oppervlak (B), die in open verbinding staat met de omgevingsdruk.



Figuur 10. Doorsnede tekening van de luchtgesmeerde persluchtcilinder.

Met enige aanpassingen in de bewegende massa van de zuiger bleek deze luchtgelagerde persluchtcilinder ook geschikt voor zeer hoge bewegingssnelheden (10 – 20 Hz). Bij conventionele persluchtcilinders werden de afdichtingen te warm waardoor een ernstige vorm van slijtage optrad met een zeer korte levensduur tot gevolg.

Slotbeschouwing

Het ontwerpen van gaslagers is een creatieve bezigheid. In dit artikel is slechts een beperkt aantal uitvoeringsvormen van voorweerstand gegeven. Door te werken met basisvergelijkingen heeft de constructeur goed inzicht in de parameters waarmee een optimaal ontwerp kan worden gerealiseerd.

Tot nu toe zijn gaslagers veelal daar toegepast waar zeer hoge eisen aan de bewegingsnauwkeurigheid gesteld worden. Er zijn tal van andere redenen om voor gaslagers te kiezen. Met de huidige stand van de fabricage-techniek vormen de hoge eisen aan de nauwkeurigheid van de onderdelen vaak geen belemmering meer. Hierdoor vormen gaslagers bij de keuze van lageringen en rechtgeleidingen een serieus alternatief.



Lit.1. De inhoud van dit artikel is ontleend aan hoofdstuk 10 van het boek *Tribologie, Levensduur en Prestatie*. In dit boek zijn tal van basisvergelijkingen terug te vinden waarmee de constructeur in staat is alle mogelijke geleidingen te ontwerpen en berekenen. Onderwerpen die verder in dit boek aan bod komen zijn: statisch en dynamisch draaggetal van punt- en lijncontacten onder invloed van tractie, tandwielen, beheersing van wrijving en slijtage, stick-slip, smeringsregimes, slijtvaste materialen en materiaalkeuze, eigenschappen en selectie van coatings, hydrodynamische en hydrostatische smering et cetera.

Prijs € 45.- Voor meer informatie of bestel gegevens zie www.tribologie.nl of mail a.vanbeek@wbmt.tudelft.nl en vraag naar de promotiefolder.

Laserconfiguratie en

Veelzijdige laserbronnen van verschillende soort en sterkte spelen in toenemende mate een bepalende rol in de hedendaagse industrie. Lasers zijn immers essentiële, hoogst flexibele gereedschappen die gemakkelijk te integreren zijn in productieopstellingen. Zeer uiteenlopende, schijnbaar onmaakbare zaken zijn contactloos te realiseren middels dergelijke geconcentreerde lichtbundels met hoge vermogensdichtheid. Er komt dan ook geen eind aan de stroom innovaties in de vorm van bruikbare laservarianten en economisch-technisch aantrekkelijke toepassingen, gericht op zowel metalen, kunststoffen, hybride materialen en laminaten, als technische keramieken.

• Ing. Jan L.C. Wijers •

Duidelijk is dat in de 21^e eeuw licht op vele gebieden de gangmaker wordt voor een keur van innovaties. Deskundigen schatten realistisch in dat 30% van de elektronische technologieën nu door optische vervangen zal worden. Los van de wankelende telecommunicatiesector volgen hier enkele aansprekende voorbeelden van wat fotonen gaan brengen. Om de volgende stap te realiseren in de microminiaturisering van de komende generatie nog krachtigere en snellere chips zoekt men de grenzen van optische belichting op, met extreem ultraviolet straling tussen 11-14 nanometer (Fraunhofer Instituut Laser Techniek). Opereren met licht gaat sterk toenemen. In de auto zullen meer functies per glasvezel verlopen en wordt 'intelligent licht' geïntroduceerd, dat zich aan telkens veranderende omgevingssituaties zal aanpassen. Dit gaat bijvoorbeeld via adaptieve en draaibare koplampen, mede dankzij programmering van geavanceerde elektronica. Lasers passen naadloos tussen al die vernieuwingen gebaseerd op licht.

Laser dringt door in het leven van alledag

Al lange tijd is de mens flink op gang met vernieuwingen die gebaseerd zijn op licht. Einstein werkte anno 1917 al aan 'gestimuleerde emissie' plus theorie, Gould introduceerde het begrip 'laser' anno 1957, terwijl Maiman op 16 mei 1960 de eerste laser daadwerkelijk op gang kreeg en de eerste CO₂- en Nd:Yag-lasers in 1964 uitkwamen, gevolgd door de excimeerlaser in 1980. De meesten van ons beseffen dat nog niet zo duidelijk, maar denk ondermeer eens aan de laserpointer in plaats van de aanwijzestok, de glasfiber met fiberlasers voor snelle en storingsvrije lokale en intercontinentale telecommunicatie (zelfs op de oceaانبodem), de barcodelezer bij winkelaankopen, gelaserde perforatiepatronen in het nieuwe paspoort, de laserprinter en cd-recorder thuis, met als laatste de 'rewritable DVD' (Digital Versatile Disc) voor dataopslag. En vergeten we niet de diverse bewakingsfuncties, zoals de beveiliging in de werkplaats rondom kantbanken en persen.

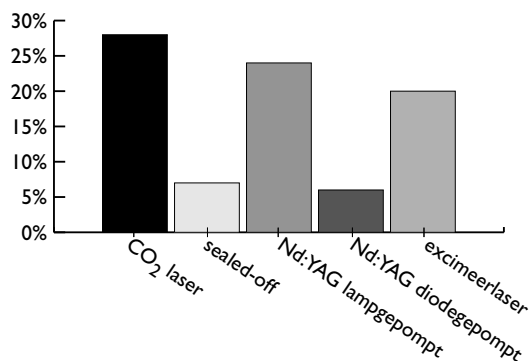
technologie gaan om

Contactloos verlopende laserbewerkingen als snijden en lassen vormen in onze maatschappij een drijvende kracht gekoppeld aan hoogstaande technische innovaties, zoals de lineaire motoren en dito geleidingen, naast hun rechtstreekse bijdrage aan de versterkte toepassing van aluminium in de auto-industrie. Als gevolg van deze 'Enabling Technology' (zie figuur 1) zijn al duidelijke verschuivingen in applicatiegebied te bespeuren. Lasers vervangen traditionele technieken in de metaalsector en/of vullen deze aan (zie figuur 2). Het afgelopen decennium groeide het gebruik van lasers in de metaalindustrie substantieel, vooral het aandeel van CO₂-lasers (tabel 1).

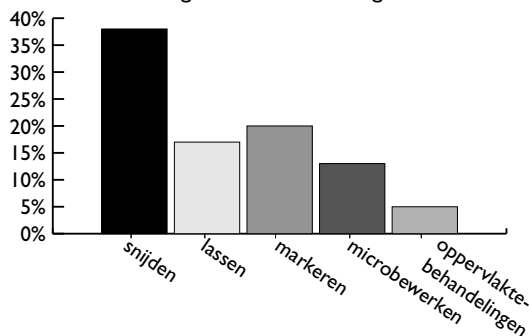
Tabel 1 (cijfers Frost & Sullivan)

25% van alle materiaalbewerkingen verloopt via gebruikmaking van lasers.

De ingeschatte verdeling over de verschillende lasertypes ligt als volgt:

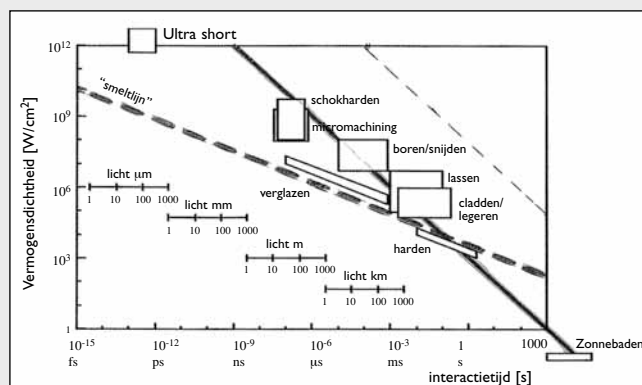


60% van de genoemde lasers vindt toepassing in materiaalbewerking, naar de verhouding:



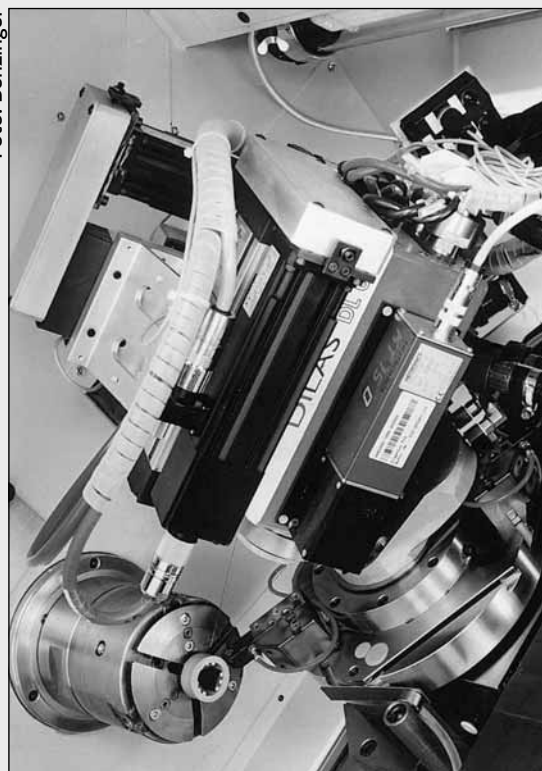
Essentiële achtergronden

Momenteel is sprake van een stille strijd tussen vastestoflaser en gaslaser, en wel zodanig dat in het algemeen de concurrentiepositie van genoemde kooldioxydelaser



Figuur 1. Overzicht van lasertoepassingen naar vermogensdichtheid en (interactie)tijd. Buiten de gangbare lasertoepassingen die tot voorkort eindigden bij 10⁻⁸ s, liggen de potentiële mogelijkheden van de Femtosecondenlaser. De doorgetrokken lijn in het midden is de lijn van 1 kJ/cm² constante energiedichtheid.

Foto: Benzinger



Figuur 2. Door de uitermate compacte vorm van hoogvermogen diodelasers, past zo'n HVLD boven de revolver van een precisiedraaibank. Door opwarmen van het werkstuk is keramiek op 0,3 μm Ra te draaien.

in gevaar komt. Bij metalen geeft de golflengte van de YAG-laser een betere absorptie van het geconcentreerde licht aan het oppervlak, zodat met lager vermogen hetzelfde resultaat wordt bereikt. In de praktijk verschilt bovendien de bruikbare wijze van straalgeleiding sterk per lasersoort, opnieuw ten gunste van de vastestof-laser dankzij de flexibele glasvezelsystemen (CO₂ via dure en relatief zware, al of niet gekoelde GaAs- of Ge-spiegels). Daarnaast komen er alternatieve configuraties en bewerkingsmachines uit, berustend op zowel industrieel bewezen CO₂-lasers (hetzij als *fast/slow axial flow*, *sealed off*,

TEA of *cross flow* en *wave guide* uitvoering) als op Nd:YAG-versies. Tot voor kort vormden buisvormige versies van de CO₂- en de Nd:YAG-laser de standaarduitvoering, wat gaat veranderen. Enkele vooraanstaande lasergebruikers in de auto-industrie hebben intussen ook al eerste modellen hoogvermogen halfgeleiderlasers opgesteld in de productielijnen. Binnen alle toepassingen vormt CAD/CAM de sleutel tot hoge laserproductiviteit. Een gegeven blijft dat, om er maximaal profijt uit te trekken, men moet construeren op de bijzondere eigenschappen van lasers (separate afdichting vervalt bijvoorbeeld door de lasnaad van een braamloos lasergesneden halfproduct hermetisch gesloten door te trekken, bijvoorbeeld in pacemakers). Verbetering via systeemintegratie brengt nog grotere winst in eigentijdse laserinstallaties. Zo zorgt lasersnijden en -lassen van buisvormige producten voor een opmerkelijke stroomlijning van het huidige productieproces. Dankzij de enorme hoeveelheid kennis die intussen systematisch is opgebouwd gaan lasersystemen zichzelf in de toekomst monitoren en adaptief kritische procesgrootheden bijregelen, zoals vermogen, focuspositie en bewegingssnelheid, via gesloten regelkringen. Ook lost geïntegreerde on line vermogensmeting een sluipend verloopende degradatie over de tijd op. In principe zijn de hier beschreven evoluties meestal het resultaat van gericht onderzoek om bepaalde minpunten weg te nemen (zie tabel 2).

Als voorbeeld: bij zogenaamde vlakbed snijmachines met een werkbereik van gemiddeld 4x6m gaf de tijdens bedrijf variabele bundellengte aanleiding tot ongelijke condities, resulterend in wisselende productkwaliteit. Door integratie van een speciale installatie die automatisch de optische weg constant houdt komt dat verschijnsel niet meer voor op moderne lasermachines (figuur 3). Het dure imago van lasers gaat men beantwoorden met acties die de bedrijfskosten omlaag brengen, de installatie bedrijfszekerder en onderhoudsruimer maken en die een verbeterde straalkwaliteit opleveren, zelfs bij hoger vermogen. Stijgende kwaliteit betekent een op een: betere focusseerbaarheid, groter mogelijke werkafstand en betere efficiëntie, wat rechtstreeks hogere processnelheid of diepere penetratie oplevert of lager benodigd vermogen. Tot zo'n 500W gemiddeld vermogen ligt de beste straalkwaliteit momenteel aan de kant van de HVDL-gepompte vastestoflaser, daarboven excelleren CO₂-lasers. Vroegere CO₂-lasers werden overwegend continu gebruikt met een DC-voeding en elektroden in het lasergas. Overgang op hoogfrequente excitatie levert, naast gestegen vermogensdichtheid, verbeterde pulsatie en modulatie en minder behoefte aan onderhoud op (figuur 4). Doordat de elektroden buitenom de laserbuis zitten

Tabel 2 Plus- en minpunten van de inzet van lasers

Plus:	Min:
-Contactloze actie	-Hoge initiële investering
-Meestal geen (slijtend) gereedschap nodig	-Hoog energiegebruik
-Supersnelle interactie	-Laag tot zeer laag rendement
-Hoge energiedichtheid	-Over het algemeen dikte-gelimiteerd
-Hoge bewerkingsnelheid	-Hoogwaardig vormgeven: nauwe toleranties
-Effectief onafhankelijk van materiaalhardheid	-Exacte geometrie en spleet bij lassen vraagt aandacht
-Zeer goed stuur-, regel-, doseer- en focusseerbaar (minimale vervorming)	-Dampvorming als gevolg van bewerking
-Laserstraal op te splitsen meestal nogal complex van aard	-Lasergesteunde processen
-Uitermate reproduceerbaar	-Prijs en levensduur van de pomplampen (bij conventionele YAG-laser)
-Minieme warmte-beïnvloede zone	
-Grote vrijheid in positie spot en geometrie	
-Hoge flexibiliteit (uiteenlopende processen, materialen, diversiteit aan toepassingen)	-Optisch (ander) karakter van de laser(technologie): speciale opleiding
-Lassen zonder toevoegmateriaal	-Beperkte beschikbaarheid bruikbare lasertechnologie
-Minimale nabewerking vereist (hoge zuiverheid + bijvoorbeeld braamloos snijden)	-Routineonderhoud
-Hoge nauwkeurigheid te behalen	-Veiligheidsaspecten (straling, hoogspanning, damp)
-Processen uitstekend te automatiseren	

en inkoppeling capacitief gebeurt, worden lasergas en resonator niet meer verontreinigd en ontstaat een meer uniforme ontlading. Voortaan levert daarom marktleider Trumpf de serie HQ TLF-turbo CO₂-lasers met HF-pompbron met een ongekend hoge k-factor van 0,9 (dicht tegen de fysisch haalbare grenswaarde) en met onderhoudsvrije magneet-gelagerde turbo-radiaalpompen. Eveneens komen de excimerlaser, koperdamplaser (golflengte 578nm) en ultrakort pulserende femtosecondenlasers opzetten. Deze types zullen zich vooral manifesteren in het microbewerken, wel de snelst groeiende toekomstmarkt genoemd. Daarnaast is al lange tijd de vrije-elektronenlaser en (voor militaire doeleinden) de chemische laser (golflengte 1-3µm, MW-vermogen bereik) onderwerp van wetenschappelijk onderzoek. Beide zijn nauwelijks van belang voor metaalbewerking, hoewel er ongetwijfeld een zekere spin-off zal volgen.

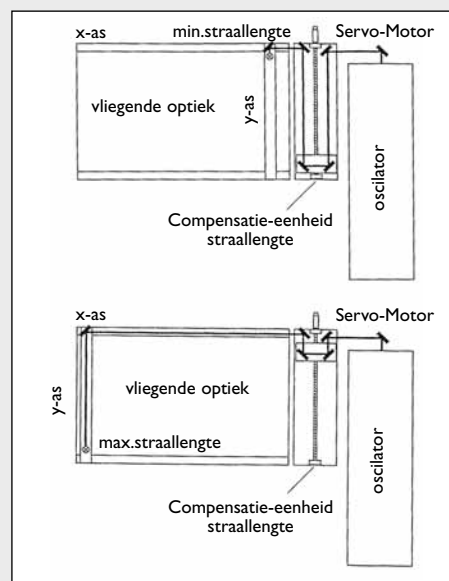
Laser: principe en eigenschappen

Het principe van de laser is een lichtversterker die ingaande elektrische energie omzet in straling, volgens de begrippen die staan voor het acronym LASER:

Light		licht
Amplification by		versterkt door
Stimulated	ofwel:	gestimuleerde
Emission of		emissie van
Radiation		straling

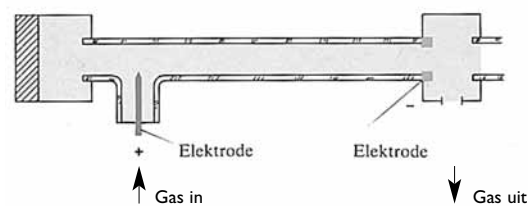
In de praktijk beschouwt men een laser veelal als een blackbox. In de configuratie (figuur I/1) is echter minimaal een drietal basiselementen te onderscheiden, namelijk het actieve medium dat de laserende actie mogelijk maakt (via spontane en gestimuleerde emissie), een pompbron voor de daarbij benodigde energietoevoer in optische, elektrische of chemische vorm en een resonator (of caviteit of trilholt, tussen een 100% reflecterende eind- en een gedeeltelijk doorlatende uitkoppelspiegel met identieke optische as) waarbinnen de heen en weer gaande laserbundel wordt opgewekt en versterkt.

Het doorgelaten gedeelte van de straling vormt het uitgangsvermogen van de betreffende laser. Opmerking: veelal is door het in het algemeen lage laserrendement een fors gedimensioneerde koeling voor de afvoer van de restenergie noodzakelijk. Ten opzichte van de lichtemissie van andere thermische lichtbronnen als de zon en gloeilampen onderscheidt deze jonge, universeel bruikbare lichtbron zich door een aantal typerende eigenschappen. Het gegenereerde laserlicht wordt slechts in

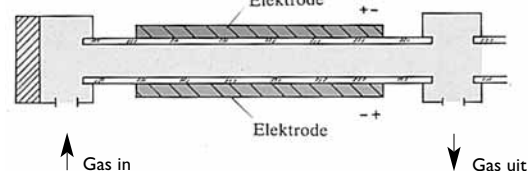


Figuur 3. De nu bij veel lasersnijmachines voor plaatwerk voorkomende oplossing om de straallengte voor- en achteraan op grote plaatlengtes constant te houden (en daarmee de slijcondities en kwaliteit).

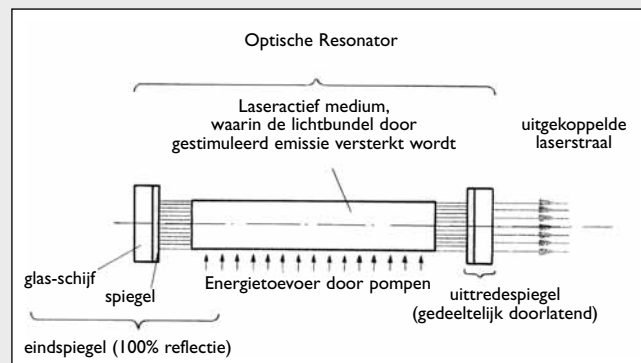
Gelijkstroom voeding



Hoogfrequent voeding



Figuur 4. Twee voorkomende principes van ontladingsystemen bij CO₂ lasers. Boven een hoogspanning DC-uitvoering: beide elektroden in rondstromend lasergas. Onder de fraaiere hf-constructie met gedeelde metalen mantelelektrode buiten om de glazen laserbuis.



Figuur I/1. De drie basiselementen van elke laser: het laserende materiaal, de pompbron en de trilholt.

Tabel 3 Overzicht gangbare lasertypen

	CO ₂ (kooldioxyde)	Nd:YAG	Excimeer		
			XeF	KrF	ArF
Aggregatietoestand	gas	vaste stof	gas	gas	gas
Actief lasermedium	CO ₂	Nd + + +	XeF	KrF	ArF
Golflengte (nm)	10.600 (Infra-Rood)	1.064 (IR)	350(UV)	248(UV)	193(UV)
Bundelkwaliteit	0,9 (3kW HQ Trumpf)	0,02 (100-400W)			
Pompbron	Elektrisch: HF/DC	Optisch (lamp/diode)	Elektrisch		
Maximumvermogen	25 kW	4,5-5 kW (CW)	1 kW		
Piekvermogen	40kW-20MW	± 20 kW (Q-sw 500kW)	50 MW		
Rendement	≥10%	ca. 3%	≤ 2%	< 2%	2%
Mode	CW/Puls	CW/Puls (evt. Q-sw)	Puls	Puls	Puls
Pulsfrequentie	100 Hz - 100 kHz	1 kHz	<1000 Hz		
Bundeldiam. (mm)	0,2-0,4	0,04 - 0,6			
Straalgeleiding	optieken (flying optics/ robot; niet met glas- vezel aangezien CO ₂ inkoppelt op glas)	optische vezels	fiberbundel		
opmerking	hoog vermogen hoog rendement	precisie-lassen/ -snijden/-boren	UV-lasers met hoge energie en grote spot		

één richting uitgestraald, waarbij de stralen in hoge mate parallel blijven, ofwel de stralenbundel divergeert minimaal. Daarmee gaat in de praktijk een uitstekende focusseerbaarheid gepaard. Standaard wordt slechts straling met een eigen specifieke golflengte uitgestraald, wat wil zeggen dat de laserbundel monochromatisch is. Naast de golflengte zijn ook richting en fase gelijk, met andere woorden: de spectraal gezien elektromagnetische golven zijn coherent. Dit alles resulteert erin dat een krachtige straal ontstaat met een hoge vermogensdichtheid op een klein vlak, zeker als die geconcentreerd wordt in het brandpunt. Voor laserbewerken is het vermogen dat nodig is, de focusseerbaarheid en de straalkwaliteit van de uit-tredende bundel van het grootste belang. Bij de wisselwerking van de intensieve lichtbundel met het materiaaloppervlak brengen thermische processen een materiaalverwijdering (door smelten, verbranden of sublimeren) of een structuurverandering tot stand. Van invloed op de kwaliteit zijn verder de golflengte, de mode waarin wordt gelaserd en CW (continu) of gepulst bedrijf. Er bestaan nogal wat verschillende configuraties van lasers, waarvan momenteel de meest gebruikte zijn: de CO₂ ('gaslaser' genoemd, immers met een gasvormig actief medium), Nd:YAG (medium vaste stof) en excimeerlaser (gaslaser) waarvan tabel 3 de belangrijkste specificaties geeft.

Spreeken over 'de laser' toont dan ook weinig begrip over dit zeer verscheiden gebied. Figuur I/2 geeft de verdeling van de verschillende lasertypes over het golflengtespectrum. Verschillen in de absorptie karakteristiek van CO₂, YAG en excimeerlaser worden zichtbaar in figuur I/3. Hieruit blijkt duidelijk dat, afhankelijk van onder andere de golflengte, oppervlaktestructuur, ruwheid, oxydehuid wel of niet, coating, invalshoek en temperatuur, per laser een onderling afwijkend percentage van de uit-tredende stralingsenergie wordt geabsorbeerd door het materiaaloppervlak. Nd:YAG-straling koppelt daarbij bijvoorbeeld aanzienlijk beter in op de meeste metalen dan licht van de CO₂-concurrent.

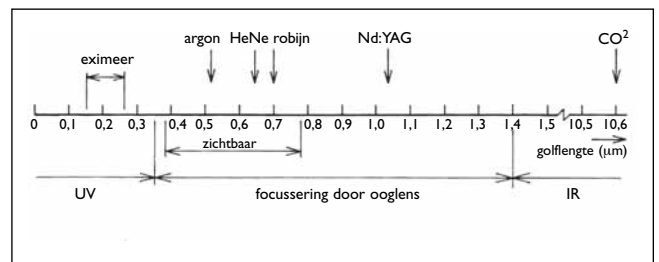
Remote laserwelding

Recent zijn enige veelbelovende nieuwe ontwikkelingen naar buiten gekomen die het laserlassen sterk kunnen promoten. Beide ontwikkelingen komen rechtstreeks tegemoet aan een tweetal klassieke minpunten van het laseren. Zo moest tot voor kort vlak boven de werkzone nog scherpgesteld worden met een focusseerkop om het focus al naar gelang de gebruikte technologie-instellingen op, in of onder het werkstukoppervlak te leggen. Extra maatregelen moeten dan getroffen worden ter

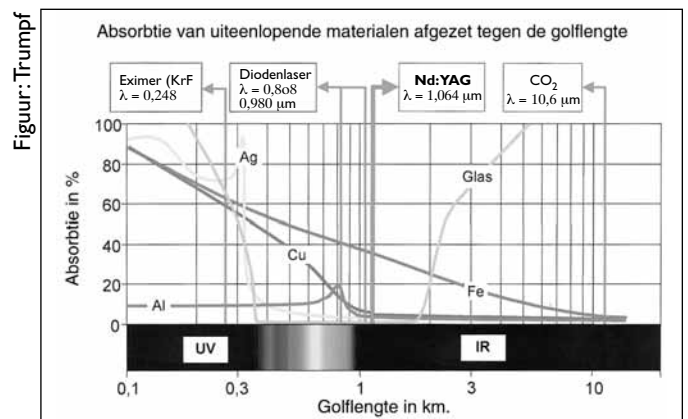
bescherming van de dure optiek om een bedrijfszeker verloop te garanderen in de tijd (tegen te hoge lichtintensiteit (ook vanuit het plasma), hoge temperatuur, rondvliegende metaalspetters en metaaldamp). Ondermeer past men daarvoor gasbescherming om de lens toe, alsmede een snel wisselbaar schermglaasje bij uittrede van de straal. Binnenkort lost *Remote Laserwelding* dit probleem, voor 2D-, 2½D- en 3D-toepassingen, direct op door letterlijk met de laserbron afstand te nemen van het werkstuk. Door middel van een nieuw, zeer dynamisch scannend systeem, met een zeer lange brandpuntsafstand en hoog liggende, bewegende spiegels op razendsnel reagerende galvanometerspiegels ontstaan geheel nieuwe

Tabel 4: Industriële, wetenschappelijke en medische laserapplicaties in metaal, kunststof en overige technische materialen

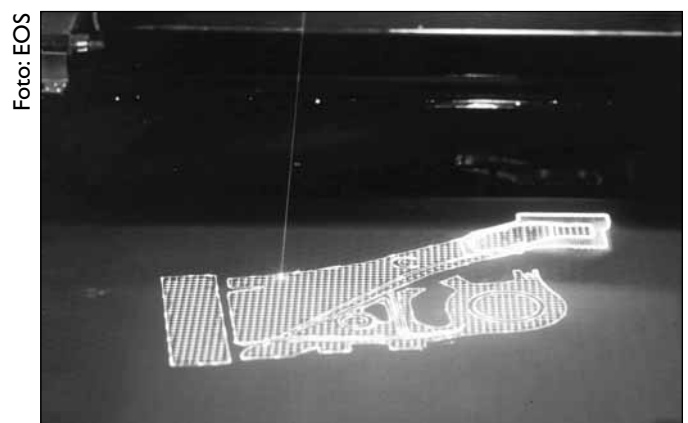
- (direct of ondersteund door een laser):
- LASER-snijden
 - -verbinden (lassen en solderen van metalen en kunststoffen)
 - -markeren en -graveren
 - -boren
 - -perforeren
 - -trimmen
 - -frezen (*lasercaving*)
 - -ritsen (*scriben*)
 - -balanceren
 - -(draad)strippen
 - -materiaaldepositie/opgroeien (zie figuur 1/4)
 - -microbewerken
 - -microstructureren
 - -microlithografie
 - -warmtebehandelingen ((transformatie)-harden, gloeien et cetera)
 - -oppervlakteveredeling (legeren, dispergeren, cladden cq bekleden)
 - -justeren
 - -reinigen (matrijzen, restauratie kunstwerken, steriliseren)
 - -ablatie
 - -dressen (slijpschijven)
 - -scannen
 - -meten (geometrie, afstand, aantal deeltjes, debiet, gasanalyse, machineafname cq uitrichten met behulp van een laserinterferometer)
 - -buigen/ 3D omvormen van plaat
 - -holografie
 - -chirurgie (contactloos: schoonheidscorrectie waaronder liposuctie en oogheelkundige correcties)
 - lasergesteund (hard)draaien (keramiek), frezen en etsen.



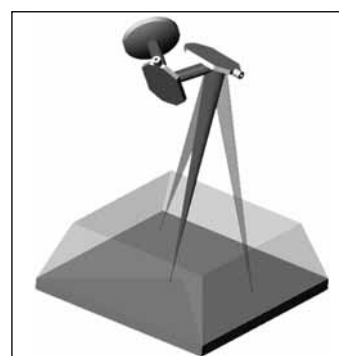
Figuur 1/2. Typerende lasergolflengten van de meest toegepaste lasertypes in relatie met het oog.



Figuur 1/3. Absorptie van uiteenlopende materialen afgezet tegen de golflengte.



Figuur 1/4. RP geeft door middel van een scannende laserstraal, laag voor laag uithardend, een CAD-model.



Figuur 5. Het ruimtelijke scansysteem zoals marktleider Trumpf dat recent presenteerde ter versnelling van lasbewerking (naad-, punt- en 'step'las) en vergroting van het applicatiebereik.

mogelijkheden, met grotere vrijheid in opspannen en lasstechniek (figuur 5). Tevens vergroot, bij de op de jongste EMO getoonde CO₂-machines met de zeer snelle ruimtelijke positionering (neventijden drastisch omlaag) van de spot op de hoogte van het stilliggende product, het werkveld enorm tot typisch 1000x1000mm. Door het 'ongedwongen' karakter verloopt het scannend naad-/puntlasproces aanzienlijk sneller (50%) dan traditioneel, met speciale optieken of met een karthesisch systeem, die beide de toegankelijkheid tot nu toe bepalen. Demonstraties met onderbroken naadlassen (*step welding*) leverden ook nog eens een sterk verminderd uitvalspercentage, doordat de meest ideale lasvolgorde ter voorkoming van ongewenste vormverandering te volgen is.

Dubbelfocus of Twin spot

Wil men lassen leggen van hoge kwaliteit dan vraagt dat door de kleine laserspot (0,1-1mm diameter) een meer dan normale afwerking van de te verbinden delen, alsmede een passende naadconfiguratie. De combinatie met lasersnijden levert daarvoor in de praktijk vaak een adequate oplossing: complexe geometrieën zijn exact passend, braamloos en met minimale oxydatie op de snijkant te snijden. Gewoonlijk vereist de nauwe lassoort bij laseren dat er met behulp van relatief dure mallen wordt aangedrukt en geklemd. Uiteraard zijn slimme oplossingen ook in de constructie te vinden: bijvoorbeeld simpelweg daar waar mogelijk een stompnaad, die gevoelig is voor processtoringsen, vervangen door een (over)lapnaad. Een andere, enigszins complexe mogelijkheid is de laserstraal als het ware 'pendelend' over de naad te bewegen. Met behulp van een simpelere, zogenaamde dubbelfocus uitvoering, met een spot links en rechts van de naad, verbetert de situatie aanzienlijk (figuur 6a). Realisatie van een *twin spot* is eenvoudig uitvoerbaar via het opsplitsen van een laserbron met een prisma of een afbuigspiegel met twee ten opzichte van elkaar onder een kleine hoek staande vlakken. Drie mogelijkheden bieden zich daarmee aan, namelijk gesuperponeerd op elkaar, in tandem of parallelbedrijf (figuur 6b). De afstand tussen beide focussen is in-proces te sturen, terwijl indien gewenst het laser vermogen per spot ruimtelijk en in de tijd apart is te regelen. Intussen heeft een project bewezen dat twin spots beter voldoen dan één brandvlek: het smelt materiaal aan beide kanten af (zonder optreden van insnoering of explosieve uitworp van materiaal), er gaat geen energie door de spleet verloren en het lasproces verloopt aantoonbaar rustiger. Dat het uitgangsvermogen verhoogd moet worden spreekt voor zich.

Vaste stof: staaf, buis, slab en/of schijf

YAG-lasers boden vanaf het begin interessante mogelijkheden, die bij andere laservarianten ontbraken. Het succes baseert zich vooral op de superieure inkoppeling op metaal en de grote vrijheid in manipuleren van de lichtbundel die geleiding middels glasfibers geeft, al of niet met een meervoudig gesplitste straal of getakt aanstralen. Daarnaast biedt frequentieverdubbeling (532 nm) en verviervoudiging (266nm) weinig problemen, waardoor laservarianten ontstaan met kenmerkend andere eigenschappen, ideaal voor fijnsnijden, microboren en graveren. Ook Q-switching is mogelijk, waarbij een optische schakelaar periodiek de uittrekkende bundel blokkeert. In die pauzes wordt de toegevoerde energie tijdelijk opgeslagen en vervolgens doorgelaten in effectief versterkte pulsen (vermogen 0-150W, pulstijd 100ns). De potentie van dit gerijpte type vastestoflaser neemt nog steeds toe, vooral nu multi-kW-versies te koop zijn. Een beperking lag in de pompbron die tot nu toe berustte op krachtige Xe of Kr flitslampen met een vrij beperkte levensduur (circa 500 uur), waarvan verwisselen bovendien tijdrovend is en geregeld storingsen oplevert. Die vorm van energie-inbreng neemt de diodelaser (met 10.000 bedrijfsuren gegarandeerd; wel tegen een hoger prijskaartje!) meer en meer over. Het laseractief medium in een vastestoflaser bestaat nu nog meestal uit een kristal (Y₃Al₅O₁₂ Yttrium Aluminium Granaat met ca. 1% Neodymium dope) in de vorm van oorspronkelijk een staafje (typisch Ø 6-8mm bij 100-150mm lengte). De slanke ronde vorm van het lasermedium komt voort uit de fabricagewijze, waarbij uit een opgetrokken kristal door middel van een kernboor meerdere volkomen identieke staafjes te halen zijn. Veelbelovende ontwikkelingen doen zich nu voor in de richting van een rechthoekige staaf (slab) of een buisvorm (figuur 7) en kort geleden als schijf. Natuurlijk gegeven is namelijk dat als gevolg van aanzienlijke verschillen in temperatuur tussen kern en buitenwand door warmte die het laserproces genereert de brekingsindex verandert. Het overtollige deel van de energie (zuiver verlies) moet worden weggekoeld, wat alleen aan de omtrek mogelijk is. In de praktijk werkt dat bij een cilinder uit in de vorm van een zekere lenswerking (toepasselijk met *thermal lensing* aangeduid). De sinds een tiental jaren bekende rechthoekige slabuitvoering kent een zigzagvormige stralengang (figuur 8). De platte brede begrenzingsvlakken met afgeschuinde eindvlakken (onder Brewster-hoek) warmen gelijkmatig op door volledige aanstraling door de pompbron, reflecteren inwendig 100% (maar niet asparallel) en bieden bovendien een zeer groot koelend oppervlak. Inwendig ontstaat ook hier een verandering in breking. Over de totale lengte

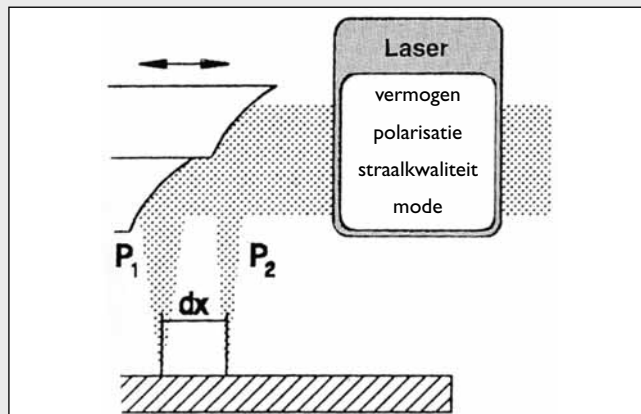
resulteert echter een vrijwel constante gemiddelde brekingsindex die onafhankelijk is van het vermogen. Met andere woorden: de slab is thermisch stabiel, wat kwaliteit betreft minstens 2 maal beter dan de conventionele staaf en hij levert een grotere indringdiepte op. Ook de CO₂-laser is nu als slabtype op de markt gebracht.

Innovatieve varianten

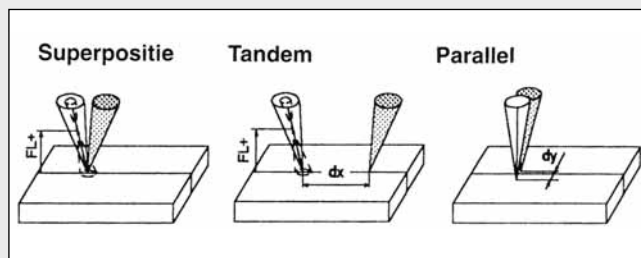
Enige tijd geleden zagen Zwitserse technici van Synova en de ETH Lausanne kans een nieuwe veelbelovende laser-variant voor precisiesnijden, boren en ablatie te ontwikkelen, door een YAG-laserstraal van hoge kwaliteit (gemiddeld vermogen 150-500 W, spotgrootte 50-150µm, puls-frequentie tot 4kHz) in het binnenste van een flinterdunne laminaire waterstraal van 100 µm (gefilterd op 0,2µm, bij 20-500bar druk en circa 20l/min debiet) in te voeren en te geleiden over een lengte van meerdere centimeters. Zodoende kan, door de totale reflectie van het omhullende scheidingsvlak tussen water en lucht, het focus als het ware ‘opgerekt’ worden tot een lengte tussen 30 en 100mm, afhankelijk van waterdruk en diameter van de waterstraal. Zonder hoogtevastelling is nu snijden mogelijk van teruggelegde of gewelfde vlakken. Na zo’n vier jaar ontwikkeling is een gepatenteerde, industriële LaserJet machine uitgebracht, die heet en koud in een straal verenigt (figuur 9). Specifieke voordelen van smelteling van de twee concurrerende straaltechnieken voor de micro-elektronica, sensortechnologie, medische, lucht- en ruimtevaart applicaties noemt men:

het koud bewerken dankzij een zeer efficiënte koeling door de ‘lichtgeleidende’ waterstraal (absoluut geen thermische beschadiging in bijvoorbeeld silicium, geheugenmateriaal, composieten, keramiek, verdere halfgeleiders als GaAs (-wafers), maar ook niet in RVS of Inconel, of in het algemeen in hoogreflecterende en transparante materialen) een zuiver parallelle, dunnere laserstraal als gevolg van geleiding door de waterstraal en de zuivere en spanningsvrije producten.

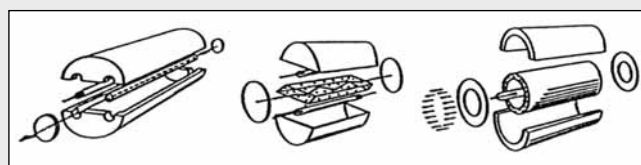
Veel wordt voor de toekomst (zeg vijf jaar) eveneens verwacht van de schijflaser (figuur 10). Deze werkt alleen dankzij koppeling aan diodelasers. Praktijkproeven van de eerste fabrikant Haas-Laser bewijzen dat op dit moment een dun schijfje uit Yb-YAG kristal van 0,3 mm dikte en 7 mm in diameter, frontaal gepompt, typisch al 1,3 kW maximaal vermogen levert. Een probleem vormt daarbij nog de koeling, alhoewel die makkelijker is aan te brengen op een platte schijf dan op een dun staafje. Bekend is intussen wel dat zich praktisch geen *thermal lensing* voordoet. De kwaliteit van de straal is met een zeer hoge M²-factor = 1.1 vrijwel optimaal en nagenoeg



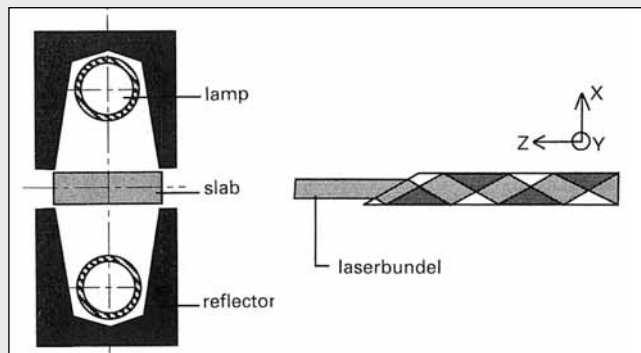
Figuur 6a. Het opsplitsen van één laserbundel met behulp van een prisma of een speciaal gevormde afbuigspiegel opent door de gescheiden energie-inbreng om de lasplaats nieuwe mogelijkheden.



Figuur 6b. Drie toepassingen met duofocus, laatste (parallel) voor lassen.



Figuur 7. Drie verschillende uitvoeringen van een lampgepompte vastestoflaser: staaf, slab en buis.



Figuur 8. Kenmerkende opbouw en stralengang van de slablaser met een rechthoekig kristal.

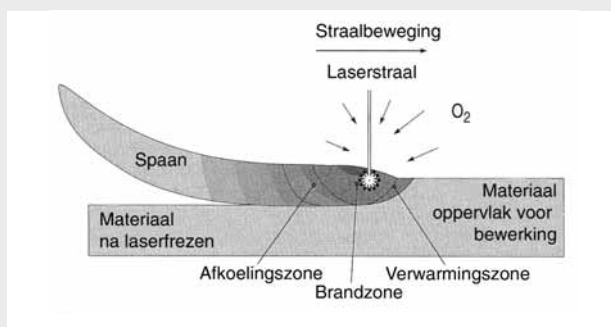
onafhankelijk van het laservermogen. Inkoppeling van de lichtenergie in een glasfiber verloopt goed, aangezien de golflengte vrijwel dezelfde is als die van een Nd:YAG-laser. Ongekend hoog voor welke laser dan ook is het rendement dat kan oplopen tot 50% (bij koeltemperatuur tussen 0-20°C, bij -74°C 64%). Ondermeer de hoge kostprijs zal ervoor zorgen dat de applicaties in eerste instantie voornamelijk in nichemarkten zullen liggen, gebaseerd op de excellente straalkwaliteit. Deskundigen zien een sterke evolutie, hoewel de industrie zelfs met factoren opgeschaalde schijflasers op zich eerder een extra mogelijkheid in handen krijgt dan een vervanger voor de standaard Nd:YAG laser.

Hoogvermogen diodelaser (HVDL)

In 1975 bracht de IC-industrie diodelasers van betrekkelijk laag vermogen op de markt. Piepjonge halfgeleiderlasers (golflengte 670-950 nm in het nabije IR, uit GaAlAs-/GaInP materiaal) maken de laatste jaren een ongekend snelle opmars van minuscule lichtbron van milliwatts tot hoogvermogen kilowattversies (figuur 11) en zijn zich vandaag de dag aan het bewijzen. Het eerste voordeel van een dergelijke HVDL ligt in de enorme ruimtewinst. Een traditionele laser neemt met voeding veel plaats in. Zo'n moderne hoogvermogen diodelaser van acceptabel vermogen bestaande uit een compacte stapeling van diodes, vult daarentegen amper een fatsoenlijke schoendoos. Ten opzichte van de CO₂ met 5-10%, lampgepompte 2-5% en diodepompte Nd:YAG 10-15% heeft de HVDL een enorm hoog energetisch rendement van 30-50% bij een duidelijk lager energieverbruik en hoge absorptie. Ook de levensduur is hoog, >10.000 bedrijfsuren, wat tot uiting komt in lage bedrijfskosten. Op vermogensdichtheid schiet de vrij dure diodelaser echter te kort (10⁴-10⁵ W/cm²), terwijl ook de straalkwaliteit nog onder de maat blijft die industrieel als gangbaar wordt geaccepteerd. Tegenover normaal één bundel met het hele vermogen, bestaat een sterke diodestraal uit een groot aantal afzonderlijke, sterk divergente lichtbundels van maximaal ongeveer 100mW, die ook nog eens asymmetrisch zijn (haaks en evenwijdig met de staaf verschillende karakteristiek). De achtergrond vormt de karakteristieke HVDL-opbouw: afzonderlijke laseremitters (p-n overgang) voegt men op een heatsink samen tot een staafvormig geheel (afmetingen 10.000 x 600 x 115 µm), vervolgens meervoudig gestapeld tot stacks (gelamineerde blok), al naar gelang de uitvoering gecombineerd met microlenzen of direct gekoppeld aan fibers tot een laserkop. Fijn focuseren van de van nature rechthoekige brandvlek van vrij forse afmeting (0,6x0,8mm) verloopt relatief moeilijk. Er wordt gewerkt met een zeer korte

Laserfrezes terug van weggeweest

Bij laserfrezes (vroeger ook wel *lasercaving* genoemd) gaat het erom rechtstreeks een vormholte met een geconcentreerde laserbundel de gevraagde maat, vorm en oppervlakte-gesteldheid te geven, zonder tussenkomst van bijvoorbeeld slijtende elektrodes. Drie verschillende principes zijn mogelijk, namelijk: smelten en wegzagen, verdampen en oxyderen/verbranden. Laserfrezes is bedoeld als stap om afwerken en nabewerken (nu deels nog handmatig) van vormgevend gereedschap automatisch te laten verlopen met alle voordelen van dien. Pers-, smeed-, (spuit- en druk-)gietmatrijzen vormen het einde van de gereedschapfabricage en tegelijk het begin van de productiefase van het product. Dat gebeurt tegenwoordig door met een gepulste energiebron plaatselijk gerichte oxydatie in te leiden (figuur 12). Zijn de vele onderling nauw verweven parameters zoals het ingekoppelde vermogen, de gastoevoer en de bewegingssnelheid correct op elkaar afgesteld, dan zorgen ontstane spanningen in het metaal ervoor dat zich een soort spaantjes vormt. Die spaantjes springen weg en leggen het onderliggende onveranderde metallische oppervlak vrij. De dikte van de laag is typisch circa 0,1mm, de breedte 0,3mm. Essentieel voor de nauwkeurigheid is het juist genereren van laserfreesbanen op basis van CAD (STL-formaat) en het exact aanhouden van de geometrie via een sensorgestuurde, in-proces teruggekoppelde diepteregeling. Voor de fabricage van prototypes is dit nu al een economisch alternatief voor meer gangbare methodes, met afhankelijk van de materiaalsoort een verspaningscapaciteit tot 25mm²/min, zoals bewezen door WTCM Verspaning (in Diepenbeek bij Hasselt, België).



Figuur 12. Spaanvorming tijdens laserfrezes door sterke verhitting in het focus (onder metaaloppervlak), de gerichte gastoevoer en de verplaatsing van de laserbundel.

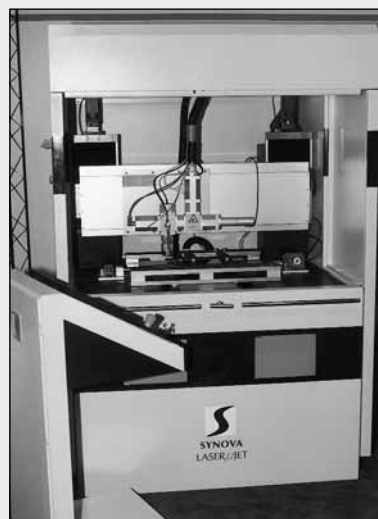
werkafstand (ca 35mm). Diodelasers zijn te koppelen aan fibers, zij het van grotere afmetingen (300-1500µm). Op verbetering van de negatieve aspecten zijn internationale, maar vooral in Duitsland lopende ontwikkelingsprojecten gericht. Het grootste probleem, namelijk het koppelen van

de afzonderlijke diodes tot een array en een stack, is intussen opgelost. Ook voor de noodzakelijke gedwongen koeling (voor de overvloedige helft van de toegevoerde energie) zijn praktische oplossingen voorhanden, zoals bijvoorbeeld microkanaal water-luchtkoeling. Op het ogenblik is de toepassing nog beperkt tot de zijdelingse pompfunctie bij YAG-lasers en in direct gebruik tot die sectoren waar de nog geringe straalkwaliteit en -intensiteit voldoen, dat wil zeggen in het harden, cladden, lassen van kunststof en in het solderen. Ondertussen past men al 3-6kW-uitvoeringen toe in productielijnen voor oppervlakteharden. Met een iets hogere intensiteit dan nu normaal is komt zelfs dieplassen binnen bereik.

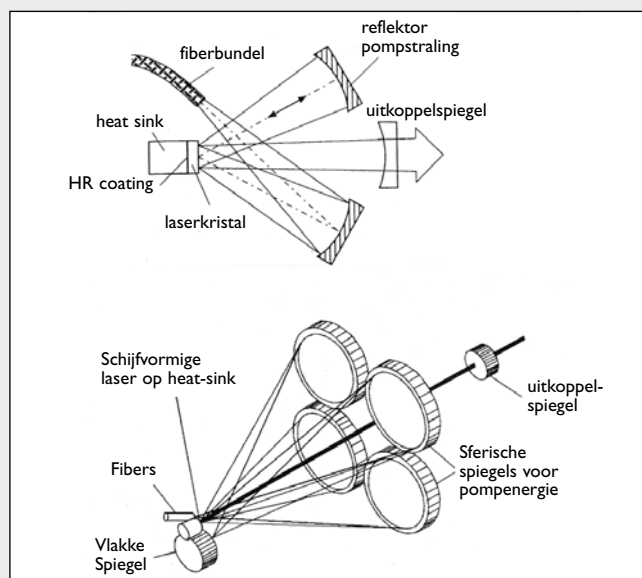
Excimeerlasers

De naam excimeerlaser is ontstaan uit de verkorte samenvoeging van de woorden EXCIted diMER. Lasermedium zijn edelgashalogenen als ArF met een kortste golflengte van 193nm, XeCl (308), KrF (248) of XeF (351), met andere woorden 3 tot 6 maal kleiner dan een Nd:YAG. Pompenergie is uitsluitend elektrisch van aard. Het totale rendement is heel laag, Bijzonderheid is dat deze hoogrendements uv-laser uitsluitend wordt gebruikt met gepulst uitgangsvermogen (0-1000W, energiedichtheid $>10^8 \text{W/cm}^2$), en wel met zeer korte pulstijden tot 20 ns, tot een piekvermogen in het MW-bereik. Een rechthoekige straal treedt uit met afmetingen in centimeters, met een uniforme intensiteitsverdeling, waarbinnen naar behoefte speciale maskers worden geplaatst. De meeste materialen kennen een sterke absorptie voor dergelijke UV-straling. Excimeerlasers hebben intussen hun industriële geschiktheid bewezen voor speciale oppervlaktebehandelingen op (sub)micronschaal; zij het vlak of 3D, onder andere fijn en nauwkeurig structureren, ablatie, markeren (*on the fly*, zelfs in transparante stoffen), boren diamant (ook mogelijk met Q-switched YAG) en microperforeren in uiteenlopende materialen als keramiek en glas alsmede polymeren. Vooral worden succesvolle toepassingen gemeld op stoffen die uiterst gevoelig zijn voor temperatuurverhoging of slecht tegen snelle thermische effecten kunnen. Voor bewerking van metalen is de excimeerlaser momenteel niet zo geschikt. Het oplossend vermogen van dergelijke bewerkingen is zeer groot, op micrometers. Fotochemische omzetting is eveneens mogelijk. Nog maar kort geleden maakte een Frans consortium bestaande uit Onectra (nucleaire installaties), CNRS (Centre National de Recherche Scientifique) en de bekende laserfabrikant Cilas (Compagnie Industriel des Lasers) het door specialisten onmogelijk geachte bekend. Men is er namelijk met behulp van een unieke experimentele opstelling in geslaagd de lichtbundel van een excimeerlaser met

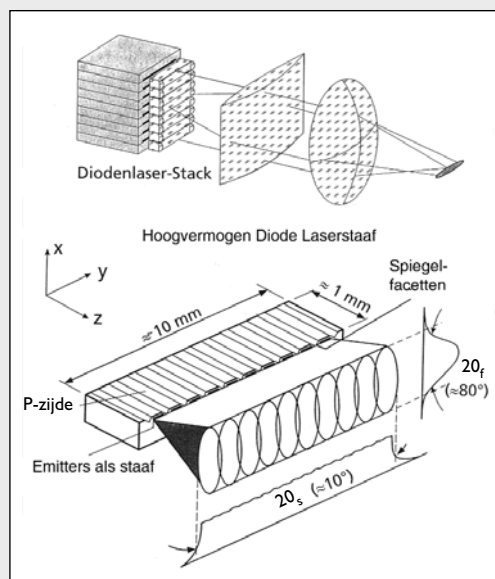
Foto: Wise 2000



Figuur 9. Laserjet. Op zich valt nauwelijks op dat in de professioneel gebouwde laserjetmachine zowel een waterstraal als een laserstraal gecombineerd voorkomen.



Figuur 10. Principe (boven) en gerealiseerde opbouw van de eerste Haas schijflaser.



Figuur 11. Boven: complete diodенlaser-stack met focusoptiek. Onder: enkelvoudige staaf.

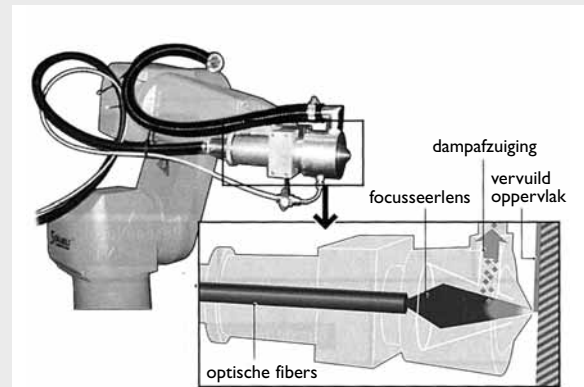
flink vermogen te geleiden door optische vezels. Het ging daarbij om een met 500 Hertz gepulste 500 Watt Cilaslaser met een samengestelde bundel van 90 glasvezels. Het werkbereik vergroot aanzienlijk door de mogelijkheid om een industrieel gestuurde robot te gebruiken. De robotopstelling met directe afzuiging, via een aangepaste conus met doorlaat voor de laserbundel (zie figuur 13), test men uit voor gedefinieerde ablatie van atomaire laagjes op radioactief vervuilde metalen vlakken.

Ultrakorte pulslasers

De femtosecondenlaser is op dit moment typisch een oplossing die vraagt om een passend probleem. Toch bieden puntvormige gefocuseerde fs-pulsen met hoog vermogen optimale condities voor (sub)micronbewerken met ongekende precisie. Immers, hoe korter de golflengte hoe beter absorptie en resolutie. Bovendien geldt: hoe korter de pulstijd, des te beter de kwaliteit. Wel is een enorm hoge vermogensdichtheid vereist. De puls frequentie is nu gelimiteerd tot 5kHz waardoor de haalbare 'verspaningscapaciteit' nog laag is. Industrieel gebruik van de hoogvermogen ultrakorte pulslasers, aangeboden door Spectra-Physics, Clark MXR en Thomson, blijft tot nu toe beperkt tot haalbaarheidsstudies en uitzonderlijke applicaties (als reparatie en reiniging van IC-maskers) in wetenschappelijke en industriële laboratoria. Dit is mede te wijten aan de hoge initiële investering. Stabiliteit en focusseerbaarheid van de niet-homogene straal vormen eveneens een drempel. Verder is het werkgebied vrij klein. De medische wereld (stents) en de auto-industrie (injectieboringen) verwacht er veel van. Dergelijke supersnelle pulsen in het nabije IR met een pulsduur in femtoseconden (10^{-15} s) openen een nieuwe wereld doordat ze voldoende kort zijn om de intermoleculaire binding te verbreken, analoog aan excimeerlasers. Opbouw en overdracht van hitte komen niet voor, dus er bestaan geen warmtebeïnvloede zone, thermoshock of smeltverschijnselen. Ablatie van diameters $<100 \mu\text{m}$ blijkt haalbaar zonder inwendige degradatie van de oppervlaktestructuur. Een nadeel is dat onder bepaalde omstandigheden materiaal op het substraat terug kan slaan. FS-lasers bieden unieke mogelijkheden; door exact focuseren zijn bijvoorbeeld bewerkingen uitvoerbaar direct onder een glasoppervlak.

Referenties

Fraunhofer ILT Instituut, Aken, dr. P. Loosen;
 Universiteit Twente, Enschede, prof. J. Meijer;
 Katholieke Universiteit Leuven (B), prof. J.P. Kruth /
 prof B. Lauwers;
 Laser Centrum VITO, dr. J. Gedopt, Mol (B)



Figuur 13. Franse opstelling die voor het eerst lichtgeleiding met glasvezels in de praktijk mogelijk maakte voor een excimeerlaser.

Laser in der Metallbearbeitung

In dit leerboek, op basis van het dictaat van professor Förster, Hogeschool Keulen, afdeling Constructietechniek, staat een beschrijving van de fysische kenmerken en eigenschappen van het tegenwoordig overal in ons leef- en werkdomein voorkomende begrip laser, de verschillende laserbronnen en bijbehorende componenten. Het grootste deel van de tekst concentreert zich op de verschillende laserbewerkingsmethoden in de metaalindustrie. Daarbinnen laat de eigenlijke doorbraak nog altijd op zich wachten. Vervolgens krijgen in het boek daadwerkelijk gebouwde lasermachines een korte behandeling alvorens af te sluiten met veiligheidsaanbevelingen. Bij dit multimediale boek, dat een bruikbare verzameling bijdetijdse basiskennis presenteert, verduidelijkt met vele afbeeldingen zonder zware natuurkundige en mathematische theorie, wordt een cd-rom geleverd die het daadwerkelijk gebruik van lasers in alle bereiken van de machinebouw laat zien met behulp van audiovisuele middelen als foto's, video's en animaties.

Auteurs: Dieter Förster en Wolfgang Müller, uitgeverij Fachbuchverlag Leipzig (Hanser Verlag), 2001, ISBN 3-446-21672-3, A5-formaat, 122 blz., 110 afbeeldingen, prijs: € 20,35.

Literatuur

'Licht Werk', inaugurele rede 2000 prof. J. Meijer, UT VM-80 'Laserbewerkingen' FME, Zoetermeer
 Workshop 'Anwendung von HLDL'
 Fraunhofer Institut Werkstoff- & Strahltechnik, Dresden
 Proc 5^e Int. Laser Marketplace/Laser 2001, München
 Bedrijfsdocumentatie Haas-Laser, Alphen a/d Rijn
 Trumpf machines Möller Metaal, Hengelo
 'Laserlexikon', Fraunhofer IWS
 'Lasersicherheit', cd-rom, Fraunhofer IWS
 Eurolaser, internationaal vakblad over lasers, Grütter Verlag, Augsburg