

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD		3
INLEDNING		4
KAPITEL I	KORT OM CO ₂ -LASERN	6
	I:1 Spektroskopi	6
	I:2 Förstärkning, moder	7
KAPITEL II	FÄRDIGSTÄLLANDE FÖR MATERIAL- BEARBETNING	9
	II:1 Sikte	9
	II:2 Bländare	14
	II:3 Evakuering av rökgas	15
	II:4 Mätning av bordshastighet	15
	II:5 Ballastmotstånd, upphängning	17
	II:6 Eliminering av lågfrekventa störningar	18
KAPITEL III	MATERIALBEARBETNING	19
	III:1 Verkan i material	19
	III:2 Laserstrålen	19
	III:3 Det bearbetade materialet	21
	III:4 Bearbetningsprocesser	22
KAPITEL IV	BORRNING	24
	IV:1 Historik	24
	IV:2 Håldiameter	24
	IV:3 Håldjup	24
	IV:4 Förhållande djup-diameter	26
KAPITEL V	SKÄRNING	28
	V:1 Historik	28
	V:2 Processparametrar	28
	V:3 Energitäthet	28
	V:4 Linskaraktistik	29

	V:5	Gasströmmen	29
	V:6	Skärhastighet	30
	V:7	Polarisationens inflytande på skärhastigheten	32
KAPITEL VI		PROVER PÅ MATERIAL	33
	VI:1	Glas	33
	VI:2	Trä	33
	VI:3	Bergarter	33
	VI:4	Slipmateriel	33
KAPITEL VII		UTVECKLINGSMÖJLIGHETER	35
BILAGOR			
REFERENSER			

FÖRORD

Sedan 1979 har Institutionen för fysik en 80 W CO₂-laser. Denna modifierades under 80-81 så att det skulle bli möjligt att utföra vissa bearbetningsförsök.

Då vi påbörjade vårt examensarbete sommaren -81 var vårt syfte från början att studera olika former av laserbearbetning som borrar, skärning och svetsning på material typ plaster och kompositer.

Det visade sig snart att vissa modifikationer och justeringar måste göras innan våra försök kunde påbörjas. Dessa ändringar har tagit en ansevärd tid och tyngdpunkten för examensarbetet har förflyttats från bearbetningsdelen till ett färdigställande av lasern för materialbearbetning.

Denna rapport innehåller dels en redogörelse för de förändringar av bearbetningssystemet vi gjort och dels en beskrivning av några grundläggande experiment.

Ett stort tack vill vi rikta till institutionschef Sune Svanberg och studierektor Elvir Andersson för visad välvilja under arbetets gång, våra handledare Kjell Bockasten och Hans Hilderfors för aldrig sinande intresse och hjälpsamhet, Sven-Göran Pettersson som bistått med goda råd och idéer, Lennart Nilsson som ritat figurerna, Margareta Arnwald för utskriften av manus samt John Bergin, Jan Olsson och Rolf Olofsson, vilka tillverkat de mekaniska komponenterna.

Lund i oktober 1982

Sven-Ivar Almqvist

Peter Blomqvist

INLEDNING

Lasern ger oss helt nya möjligheter för transport av energi, även över längre avstånd. Det är därför inte konstigt, att lasern har utvecklats till ett mångsidigt verktyg för bearbetning av olika material. En stor fördel med laserbearbetning är, att den sker utan mekanisk kontakt.

De bearbetningstyper som kan utföras med en industriell koldioxidlaser är:

- skärning
- svetsning
- ythårdning (ytbeläggning)
- gravering
- ritsning
- borrning

Det finns begränsningar ifråga om materialtyper och materialtjocklekar för olika typer av CO₂-lasrar, när det gäller olika bearbetningar. Grundläggande för de flesta bearbetningstyperna är, att man smälter eller förgasar material med ett fokuserat laserljusknippe.

Vi har tillgång till en kontinuerlig CO₂-laser med ca 80 W strålningseffekt. En bild av hela lasersystemet finns på nästa sida.

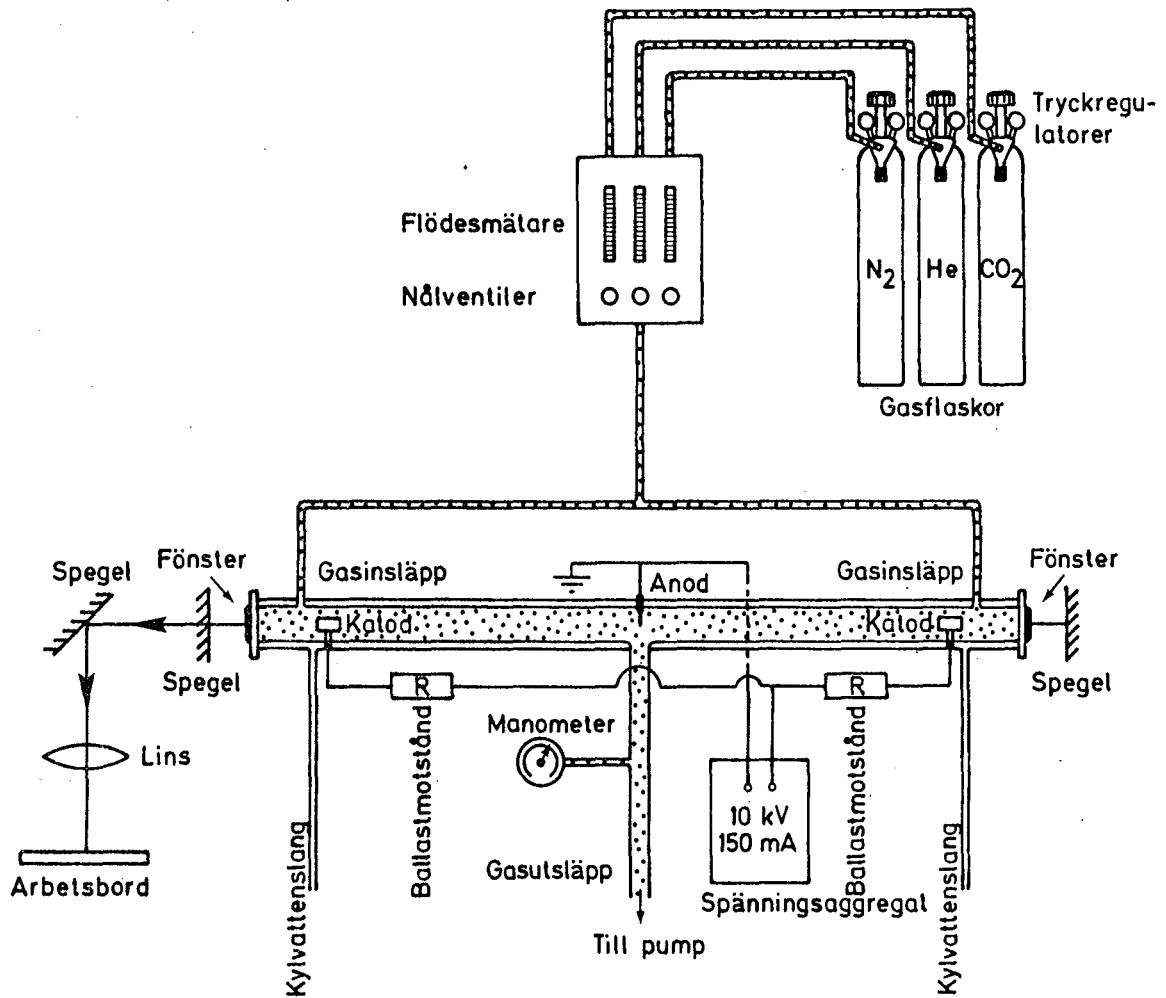


Fig 1.

I. KORT OM CO₂-LASERN

CO₂-lasern bygger på övergångar mellan olika rotations- och vibrationsövergångar hos CO₂-molekylen. Laserverkan kan erhållas i ren CO₂ men då med avsevärt lägre förstärkning än om N₂ och He tillsätts. Vanligtvis pumpas lasern genom en elektrisk urladdning i gasblandningen.

I:1 Spektroskopi

Fig 2 visar de vid laserverkan inblandade vibrationsnivåerna.

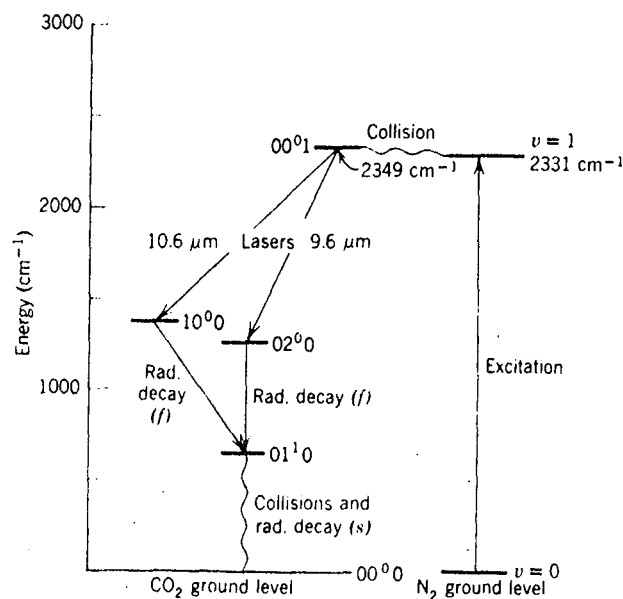


Fig 2.

Excitationen till den övre lasernivån ombesörjs av N₂-molekylerna som har sin första exciterade vibrationsnivå i jämnhöjd med den övre lasernivån. Denna nivå i N₂ är metastabil och avger därför sin energi till största delen genom kollisioner med oexciterade CO₂-molekyler, som därvid kommer i övre lasernivån.

Två undre lasernivåer finns, en som ger våglängder kring 10,6 μm och en som ger våglängder kring 9,6 μm. Våglängderna kring 10,6 μm har högst förstärkning och således kommer lasern att arbeta med denna våglängd om inga våglängdsselektiva åtgärder vidtas.

I:2 Förstärkning, moder

En laser består i princip av ett förstärkande medium som är placerat mellan två speglar.

Förlusterna i en laser mellan två reflektioner i samma spegel minskar ljusets intensitet med en faktor $e^{-2\gamma} = r_1 r_2$ där r_1 och r_2 är speglarnas reflektanser. I varje passage genom lasern förstärks ljuset med en faktor $e^{\alpha L}$, vilket medför att intensiteten ändras en faktor $F = e^{\alpha L - \gamma}$ per passage. Då tröskelvärdet $\alpha = \frac{\gamma}{L}$ överskrides, kommer ett strålningsfält att byggas upp.

Man kan visa [2] att för en förstärkningskurva av Gauss typ gäller

$$\text{Gauss-profil: } \frac{g_1}{g_2} N_2 - N_1 = \frac{8\pi\eta^3 v^2}{c^3 g(0)} \frac{g_1}{g_2} \cdot \frac{t_2}{t_p}$$

$$\text{där } g(0) = \frac{2}{\Delta v} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \approx \frac{0,939}{\Delta v}$$

$$\Rightarrow \frac{g_1}{g_2} N_2 - N_1 = \frac{8\pi\eta^3 v^2}{c^3} \frac{g_1}{g_2} \frac{t_2}{t_p} \frac{\Delta v}{2\sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}}}$$

$$= \frac{4\pi\sqrt{\pi}}{\sqrt{\ln 2}} \frac{\eta^3 v^2 \Delta v}{c^3} \frac{g_1}{g_2} \frac{t_2}{t_p}$$

där g_1 och g_2 är undre och övre nivåns vikt.

t_p är fotonlivstiden i lasern.

η är brytningsindex i lasern.

t_2 är livstiden för nivå två.

N_2 och N_1 är populationerna för nivå ett och två.

v är frekvensen.

c är ljushastigheten.

Då ljuset reflekteras fram och tillbaka mellan speglarna uppkommer stående vågor om sambandet:

$$n \cdot \lambda_0 = 2L\eta$$

gäller, i frekvensmått

$$\frac{v}{c} = \frac{n}{2L\eta}$$

n är heltal.

λ_0 är våglängden i vakuum.

Plana stående vågor längs med lasern kallas axiella moder. Frekvensskillnaden mellan två axiella moder är:

$$\nu_{n+1} - \nu_n = \frac{c}{2L'} \quad L' \text{ är laserns optiska längd.}$$

Dessa moder är ekvidistanta i frekvens och flera av dem kommer att ligga inom linjebredden $\Delta\nu$ för lasern.

Laserns spektra kommer alltså att bestå av flera linjer skilda från varandra med en frekvens $\frac{c}{2L'}$. Se fig 3.

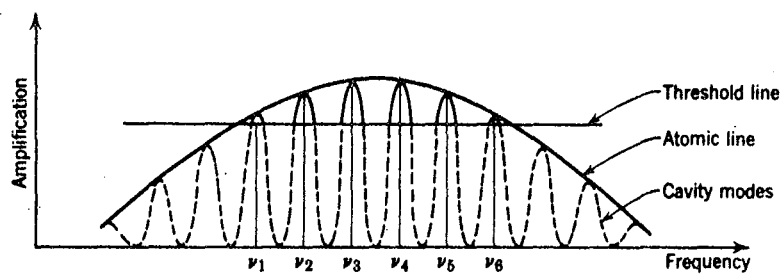


Fig 3.

II. FÄRDIGSTÄLLANDE FÖR MATERIALBEARBETNING

Vid början av vårt examensarbete var vårt syfte, som tidigare nämnts, att studera materialbearbetning med hjälp av institutionens CO₂-laser. Vi fann dock snabbt att vissa förändringar borde göras innan några försök skulle utföras. Dessa bestod bl.a. av:

- Byggande av ny fokuseringsenhet med sikte till lasern.
- Byggande av en bländare att sätta i kaviteten för att erhålla TEM₀₀-karakteristik.
- Ombyggnad av utsuget från bearbetningsburen så att rökgaser inte kommer ut i rummet.
- Byggande av bearbetningsbord.
- Anskaffande av hastighetsmätare till bearbetningsbordet.
- Flyttande av stegmotorernas ballastmotstånd eftersom värmen från dessa ändrade laserns inställning.
- Ändrande av laserns upphängning eftersom denna ej kunde ställas in på ett tillfredsställande sätt.
- Ändrande av bearbetningsbordets fästen så att fästplattan ej skulle börja självsvänga vid användande av stegmotorerna.
- Eliminering av yttre lågfrekventa störningar på laserenheten.

II:1 Sikte

För att kunna bearbeta med en laser krävs ett system som kan uppdelas i tre komponenter:

- Laser
- Fokuserande komponenter
- Enheter för förflyttning av arbetsstycket relativt laserstrålen.

Både laser och arbetsbord var färdigt då vi påbörjade vårt arbete. Vår första uppgift blev därför att konstruera och bygga de fokuserande komponenterna med tillhörande sikte för att kunna se på materialet som skall bearbetas samt hur bearbetningen utfaller.

Vårt första försök till lösning innebar att vi i strål-
gången använde en lins av ZnSe, vilket karakteriseras av inte bara hög transmission för laserljuset utan även för gult ljus. Siktets princip framgår av fig 4.

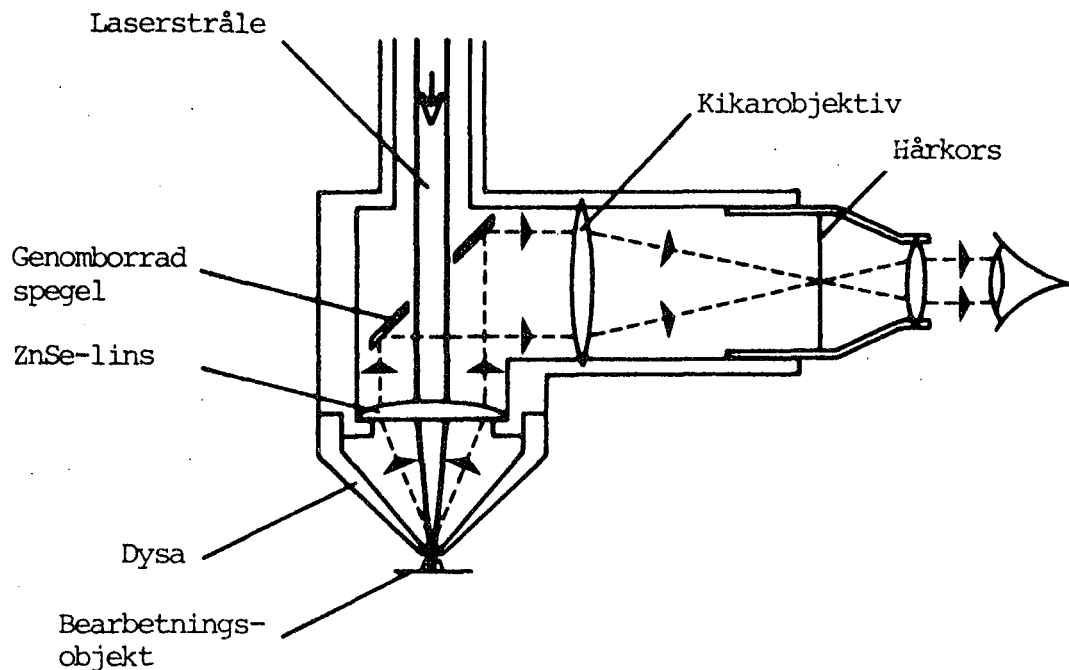


Fig 4.

I framriktningen, från lasern sett, sitter först en spegel med ett hål igenom i 45° vinkel mot laserstrålknippet så att detta kan passera obehindrat. Därefter går strålknippet igenom ZnSe-linsen för att sedan fokuseras i den punkt på materialet som skall bearbetas. I backriktningen går det gula ljuset, som kommer från materialet, upp genom dysan och bryts samman till ett svagt konvergent ljusknippe i ZnSe-linsen, randstrålarna reflekteras i spegeln för att sedan gå ut i en kikare. Dysan är den genomborrade metallkon som sitter närmast bearbetningspunkten och som har till syfte att skydda linsen. Se fig 4.

Det fanns två anledningar till att ovan nämnda försök till lösning inte höll måttet. Dels gav ZnSe-linsen upphov till så mycket sfäriska aberrationer att randstrålarna inte kunde ge en acceptabel avbildning, dels skilde sig linsens brytningsindex för laserljuset och

för det gula ljuset så mycket att $\Delta f = f_{\text{Laser}} - f_{\text{gult}} \sim 6 \text{ mm}$. Detta medförde att konvergensen för det gula ljuset efter ZnSe-linsen blev så stor att alltför mycket av ljuset gick förlorat genom hålet i spegeln. Det sista av dessa fenomen försökte vi korrigera genom att efter ZnSe-linsen placera en korrektionslins med ett hål borrat igenom. Men eftersom även denna lins kom att arbeta med randstrålarna blev de sammanlagda felen så stora att någon bild ej kunde erhållas.

Vi beslöt börja om från början.

Med hjälp av de slutsatser vi drog från vårt arbete med vårt första sikte ställde vi upp följande utgångspunkter för sikte nr 2:

- Vi skulle inte använda samma linser till siktet som till fokuseringen av laserstrålen.
- Vi skulle kunna använda siktet till båda våra linser, en 5" CdTe-lins och en 1,5" ZnSe-lins, samt till alla andra linser med brännvidder mellan 1" och 5".
- Siktet skulle utformas så att en bild projicerades på en skärm.
- Dysorna skulle utformas med hål typ Lavalmunstycke.
- Siktet skulle vara lätt att använda och det skulle vara lätt att skifta linser.

Den typ av fokuseringsanordning som vi så småningom fastnade för bygger på principen med revolverfattningen av objektiven på ett mikroskop. Här har vi dock i revolverfattning två dysor med varsin "laserlins" samt ett objektiv för projektion av bearbetningspunkten på en mattglasskiva. Se bild 1.

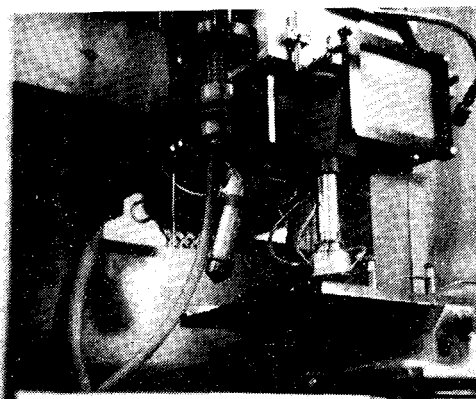


Bild 1.

De båda "laserlinsernas" brännpunkter skall ligga i samma punkt då dessa står i bearbetningsläget. Då objektivet står i samma läge erhålles en skarp bild på mattglasskivan. När man vill göra en bearbetning har man således bara att ställa in materialet så att hårcorset ligger i önskad punkt samt ställa in höjden av fokuseringsanordningen så att bilden på mattglasskivan är skarp, skifta till önskad lins samt starta lasern. Se fig 5 och 6.

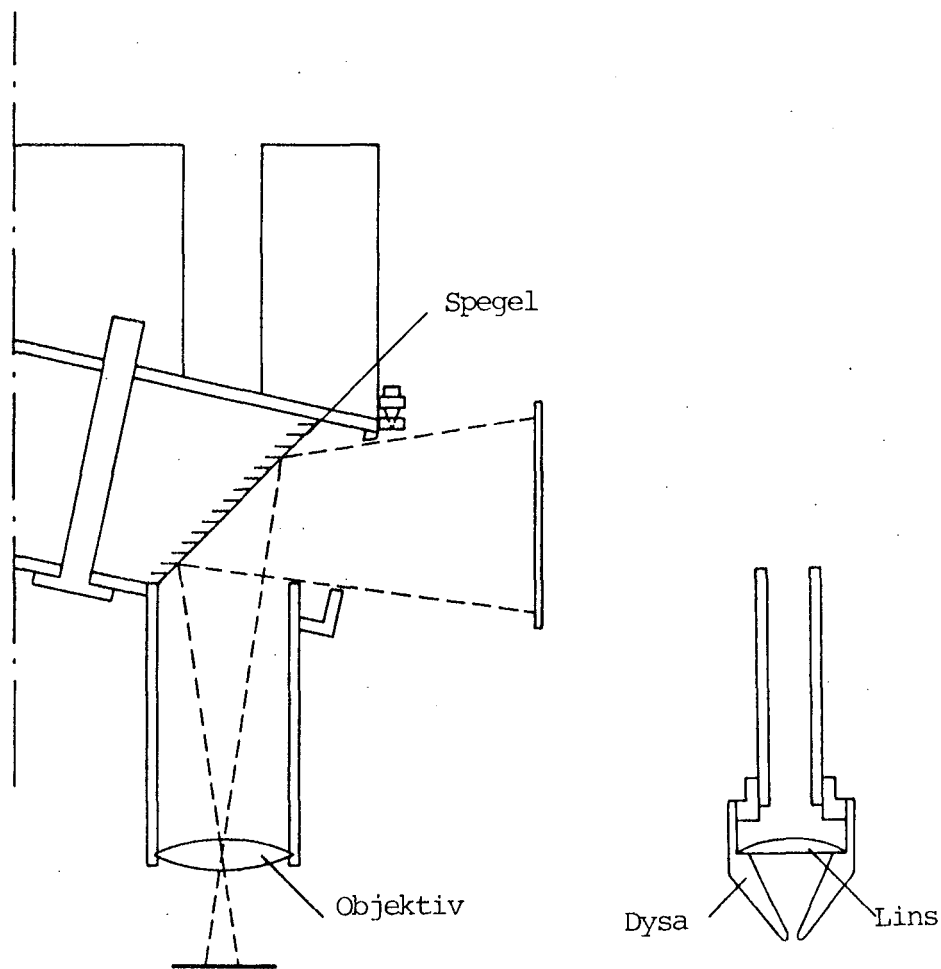


Fig 5.

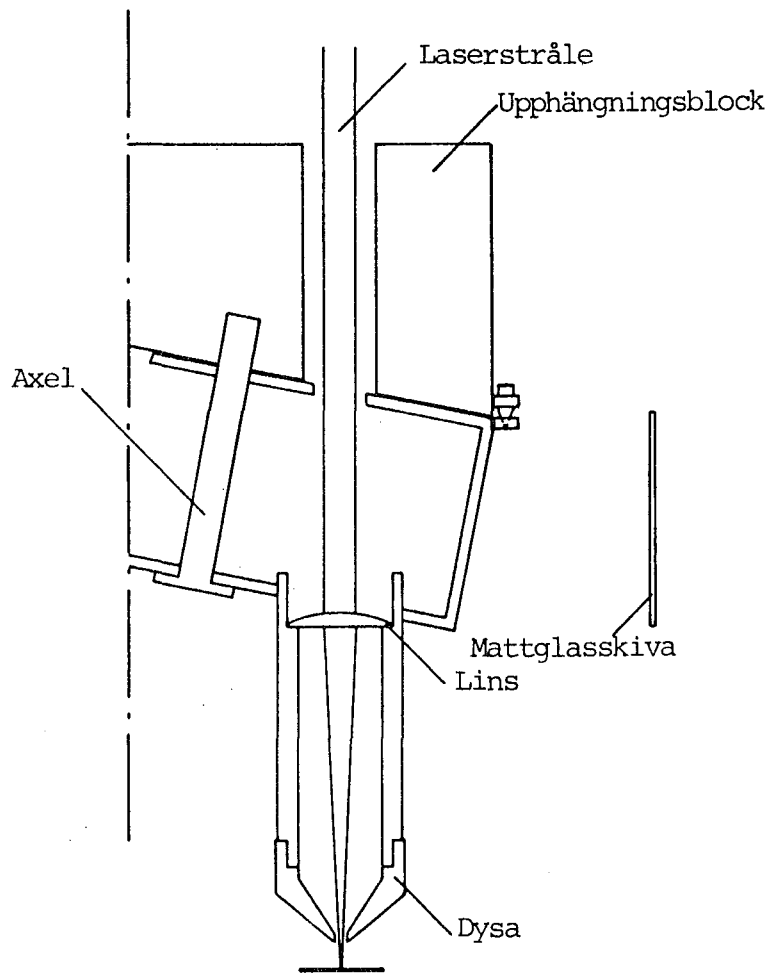


Fig 6.

Som objektiv har vi valt ett 40/1,8 Konica kameraobjektiv. Detta objektivs brännvidd är så kort att bilden av bearbetningspunkten är skarp inom ett mycket litet intervall. Eftersom det ljus som skall ge en bild på skärmen är reflekterat ljus från föremålet krävs god belysning. Vi fann ett tillfredsställande arrangemang i en 100 W fiberbelysning med två ljusledare.

II:2 Bländare

Helt axiella strålar s.k. TEM_{00} -moder ut från lasern är tyvärr svårt att uppnå. Oftast finns även strålar ut som har liten divergensvinkel s.k. transversella moder och en annan frekvens.

Eftersom tröskelvärde för de olika moderna bestämmer vilka frekvenser, moder, som skall förstärkas, kan man genom att introducera förluster i kaviteten reglera utseendet på strålnippet.

För att eliminera andra moder än de axiella TEM_{00} byggde vi en bländare, se bild 2 och 3, varmed man kan öka förlusterna i kaviteten så att icke axiella moder ej når upp till tröskelvärde. Strålnippets diameter minskar men dess effekttäthet ökar.

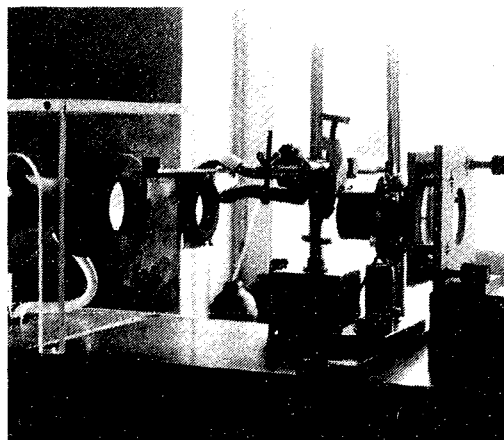


Bild 2

Bilden visar en irisbländare insatt i kaviteten.

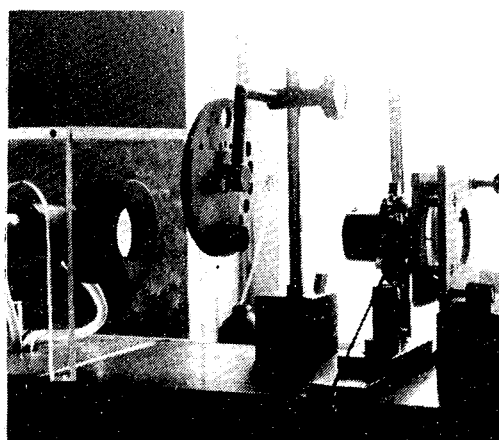


Bild 3

Bilden visar en bländare med fasta bländaröppningar.

II:3 Evakuering av rökgas

Vid vissa bearbetningsprocesser utvecklas en kraftig rök. Arbetsbordet med det bearbetade materialet är därför inkapslat i en plexiglasbur. Denna plexiglasbur är av praktiska skäl ej helt hermetiskt tillsluten, varför det fanns stor risk för att de utvecklade rökgaserna skulle sprida sig ut i rummet. För att förhindra detta anordnades dels ett "allmänutsug" och dels ett "punktutsug". "Punktutsuget" kan riktas åt olika håll och är genom en slang sammankopplad till samma uttag som "allmänutsuget".

Den utsugna röken försvinner sedan genom en fläkt, som är placerad på taket till den byggnad i vilken CO₂-lasern är placerad. För att öka utsugningseffekten gjordes ett ventilationsintag i plexiglasburen.

II:4 Mätning av bordshastighet

Arbetsbordet drives av en stegmotor med tillhörande elektronikenhet och mätaggreat. Motorn köres i fullstep, vilket innebär 1.8^o/puls och 0-3000 pulser/s. Det finns två stycken kontroller för bordshastigheten; base- och high-speedkontroll.

Base-speedkontrollen medför steglös styrning av motorn med 0-1000 pulser/sek, vilket motsvarar 0-25 mm/s i bordshastighet.

High-speedkontrollen medför steglös styrning av motorn med 100-3000 pulser/s, vilket motsvarar 0.5-75 mm/s i bordshastighet.

För att kunna utföra experiment med skärhastighet behövdes ett mätinstrument för denna. Det fanns då två alternativ att välja mellan:

Alternativ 1: En inmonterad kalibrerad hastighetsmätare, som visar aktuell hastighet direkt.

Alternativ 2: En frekvensräknare som ansluts fristående och där man själv får räkna fram aktuell hastighet med hjälp av vad frekvensräknaren visar.

Det första alternativet verkade till en början vara det bästa, men med tanke på att det finns planer på att i framtiden låta motorn styras av en mikroprocessor, fastnade vi för det andra alternativet. Det hade annars medfört större kostnader och större risk för att anordningen hade fått karaktären av "lappverk"! Den lilla olägenhet, som det medför, att displayen ej visar hastigheten i mm/s, hoppas vi skall kompenseras något av att vi nedan bifogar en lathund för beräkning av hastigheten ur pulsfrekvensen.

LATHUND FÖR MÄTNING AV BORDSHASTIGHET

<u>Antal pulser/s/$\frac{1}{s}$</u>	<u>Bordshastighet/mm/s</u>
0	0
200	5
400	10
600	15
800	20
1000	25
1200	30
1400	35
1600	40
1800	45
2000	50
2200	55
2400	60
2600	65
2800	70
3000	75

II:5 Ballastmotstånd, upphängning

Vid användandet av lasern fann vi att inställningen i z-led inte var konstant från gång till gång. Detta berodde på att under föreningen mellan lasern och bearbetningsenheten fanns placerat stegmotorernas ballastmotstånd, som avgav en avsevärd värme. Värmen från ballastmotstånden kom balken att utvidga sig. Samtidigt gjorde vibrationerna från stegmotorerna att underlaget, en spånskiveplatta upplagrad på 4 cm tjockt skumgummi ovanpå ett bord, sjönk. Laserbalken och bearbetningsbalken kom att anta en svag nedåtböjning med ett litet veck i deras skarv. Se fig 7.

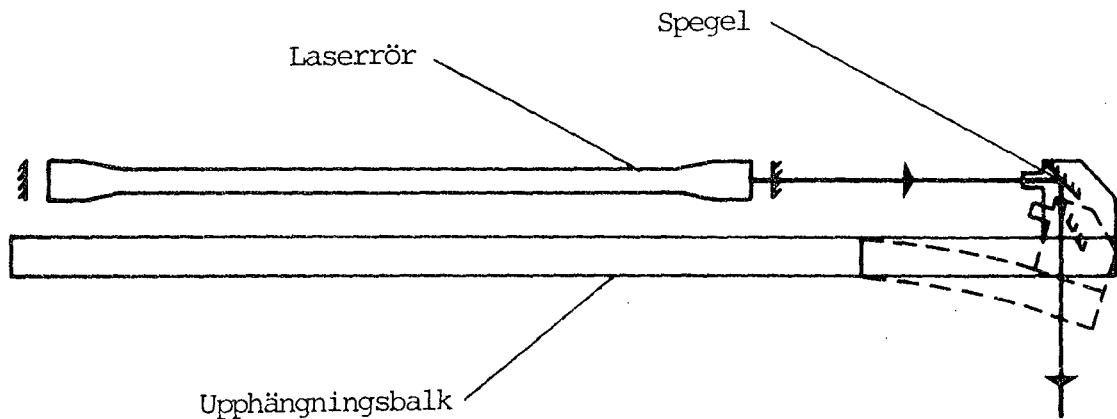


Fig 7.

Vi löste problemen genom att:

- Förstärka skarven mellan laserbalken och bearbetningsbalken.
- Ta bort spånskiveplattan med skumgummit och i stället lägga balkarna direkt på bordet.
- Flytta ballastmotstånden till en vägg i rummet, där vi också kunde montera dem vertikalt för bättre kylning.

II:6 Eliminering av lågfrekventa störningar

Laserenheten och fokuseringsenheten är fast ihopmonterade och det är ej önskvärt att yttre störningar skall få påverka systemet. För att skydda mot lågfrekventa störningar (typ vibrationer från förbi-passerande trafik) hade man tidigare monterat lasern på en skiva, vilken i sin tur vilade på en skumgummimatta. Detta visade sig ej fungera (av skäl som redovisas på annan plats) och det behövdes en ny lösning. Vi beslöt att gå till grunden med problemet, nämligen bordsbenens kontakt med det vibrerande golvet. Efter kontakt med Trelleborgs Gummifabrik angående olika slags dämpningsanordningar enades vi om en gummidämpare (RA 125EM-A Novibaisol), som tar bort lågfrekventa störningar. Detta system har visat sig fungera tillfredsställande.

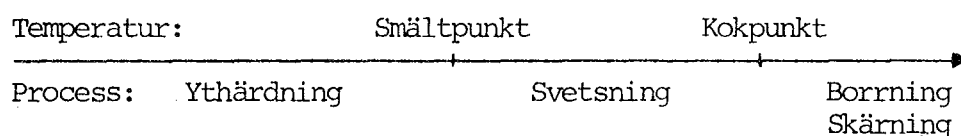
Vid materialbearbetning bör man tänka på att ej belastas eller på annat sätt störa bordet under själva bearbetningsprocessen. Bearbetningsbordet, på vilket det bearbejade materialet befinner sig, är ej fast förenat med övrig utrustning. Detta är en nackdel, eftersom fokuseringsanordningen kan förskjutas i förhållande till det bearbetade materialet.

III. MATERIALBEARBETNING

I slutet av 1960 framställdes den första gaslasern, vilket var en He-Ne laser. Därefter gick utvecklingen mycket snabbt och 1965 användes för första gången en laser i massproduktion (hålborrning i diamanter). Idag är CO₂-lasern och Nd-lasern de dominerande vad det gäller materialbearbetning. Utvecklingen av dem har varit snabb och man får förmoda att det kommer att hända mycket intressant i framtiden.

III:1 Verkan i material

Laserljuset kan uppvärma ämnen till önskad temperaturnivå. Beroende på vilken effekt man önskar uppnå väljs lämpligt temperaturområde enligt följande schema:



De processer, som vi har tittat närmare på är borrning och skärning, främst i plexiglas.

III:2 Laserstrålen

Vid borrning och skärning föredrar man en Gaussstråle (TEM₀₀) medan vid svetsning och ythårdning en stråle, som också innehåller transversella moder är att föredraga (jämnare intensitet i strålen). I fallet med en TEM₀₀-modlaser bestäms den fokuserade stråldiametern av laserns våglängd och fokuseringens konvergensvinkel ϕ .

Vid små vinklar ϕ gäller

$$d_0 = \frac{4\lambda}{\pi\phi}$$

$$\phi \approx \frac{D}{f}$$

$$d(z) = \sqrt{d_0^2 + (z\phi)^2}$$

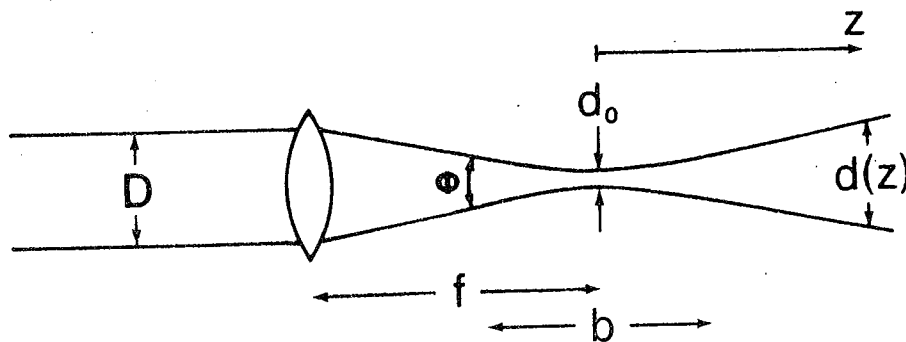


Fig 8.

I multimodfallet får man nöja sig med en uppskattning av fokusfläcken. d_0 kommer i multimodfallet att ha ett större värde $d_0^* \approx \sqrt{2N+1} \cdot d_0$, där N är den högsta modens ordningstal (l eller m i TEM_{lm}).

I vårt fall: $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ $d_0 (f=38 \text{ mm}) = 34,2 \mu\text{m}$
 $D = 15 \text{ mm}$ $d_0 (f=127 \text{ mm}) = 114,2 \mu\text{m}$
 $f = 38 \text{ resp } 127 \text{ mm}$

I praktiken är det inte möjligt att uppnå den teoretiskt beräknade fokusdiameter. Detta beror dels på linsfel, dels att vi inte har en TEM_{00} -mod. Praktiskt är den minsta fokusfläck vi lyckats uppnå med linsen $f = 38 \text{ mm}$ ungefär $0,1 \text{ mm}$ i diameter. En tumregel är att de praktiskt uppnåeliga fokuseringsdiametererna är minst 2-3 gånger de teoretiska.

Fokuseringsdjupet b (se fig 8) är mycket viktigt vid materialbearbetning. Det finns olika definitioner av b

men vi väljer definitionen, att b är avståndet mellan två diametrar (omkring brännpunkten), där diametern har ökat med 50 % jämfört med d_0 . Detta ger: $b \approx \frac{7}{4} \cdot \frac{d_0^2}{\lambda}$.

I vårt fall: b ($f = 38$ mm) = 0,2 mm

b ($f = 127$ mm) = 2,2 mm

Detta är de teoretiska värdena. Praktiskt blir b större beroende på att d_0 praktiskt blir större än d_0 teoretiskt.

III:3 Det bearbetade materialet

Materialets förmåga att uppta laserstrålens energi är beroende av materialets absorptans och reflektans. Metaller reflekterar över 90 % av laserljuset från en CO₂-laser medan icke-metaller i allmänhet absorberar över 90 % av det infallande ljuset. I nedanstående tabell 1 visas några metallers reflektans vid vinkelrätt infall för ljus från CO₂-laser ($\lambda = 10,6$ μm).

Metall	Au	Cu	Mo	Ag	Al	Cr	Ni
Reflektans i procent	97,5	98,4	94,5	98,9	97,0	93,0	94,1

Tabell 1. Några olika metallers reflektans i procent för ljus av våglängd 10,6 μm .

Absorptionen är temperaturberoende och man "förvärmer" därför ibland metaller för att få bättre verkan av laserljuset. Vi har provat på en del metaller men märkt att vår laser med sin maximumeffekt på ungefär 80 W ej räcker till. Man kan minska reflektionen genom att sota den yta som skall bearbetas, men ej heller detta gav resultat. (En sotad kopparplatta belystes, men den enda effekten blev att sotet brändes bort).

Vi har därför koncentrerat oss på icke-metaller.

Icke-metallers absorptans är i motsats till metallers absorptans oavhängig av den infallande strålens intensitet. Den absorberade energin omvandlas till termisk energi i materialet.

Den transmitterade intensiteten på djupet x i materialet kan uttryckas som:

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x}$$

I_0 : ljusets intensitet

α : absorptionskoefficienten

x : inträngningsdjupet

Om energitillförseln är tillräckligt hög börjar materialet smälta. Ytterligare absorption medför att smältområdet utvidgar sig in i materialet. Ökar energitillförseln ytterligare kan materialet börja förångas.

Det går att beräkna hur ett visst material värms upp, när det träffas av laserljus. Vid en kort puls hinner inte värmen sprida sig in i materialet förrän pulsen är över. Den tillförda energin befinner sig ett kort ögonblick inom ett mycket tunt lager av det bestrålade materialet. När smältning eller förångning väl har börjat blir det genast svårare att göra användbara beräkningar. En plym av förångat och utslungat material hindrar laserstrålen från att lämna hela sin energi till materialet. För att hindra detta sättes laserpulsens energi ned och samtidigt ökas antalet pulser. Pulstiden avpassas så att bestrålningen upphör, när "plymen" bildats och nästa puls kommer, när den försvunnit.

III:4 Bearbetningsprocesser

CO₂-lasern lämpar sig bäst för grovbearbetning p g a sin långa våglängd. För finare bearbetning används ofta Nd-lasern. CO₂-laserns långa våglängd kompenseras i de flesta fall av dess höga effekt. Vid bearbetning använder man ofta en gasstråle koncentriskt med strålnippet genom dysan mot bearbetningspunkten. Denna stråle skyddar linsen mot förångat och utslungat material, samtidigt som den ökar materialbortföringen. Gasströmmens hastighet beror av förutom själva ingångstrycket av dysans utformning (t.ex. utgångsdiameter) och avståndet mellan dysans öppning och ämnet som skall bearbetas. Vid skärning av metaller används ofta syrgas,

som genom förbränning ökar materialbortföringen. Vid bearbetning av brännbara material, t.ex. trä och papper, är det bättre att använda en gastyp, som förhindrar att de förångade organiska materialen antänds.

Laserstrålen är lätt att styra och man kan leda strålen från ett ställe till ett annat. Man kan till och med dela upp strålen och bearbeta på flera olika ställen samtidigt. Man får inga värmeskador i omgivande material eftersom endast ett litet område belyses och då det ej blir några mekaniska påkänningar på det bearbetade materialet utökas användningsområdet för laserbearbetning ytterligare.

IV BORRNING

Vid laserborrning används lasern till att bortföra material samtidigt som den relativa rörelsen mellan ämnet och laserstrålen är liten eller lika med noll.

IV:1 Historik

Borrning var den första bearbetningsprocess man använde lasern till och det finns numera många kommersiella användningar. Några exempel är borrning i plast och gummi på munstycken till aerosolflaskor, katetrar inom medicinen samt diflaskknappar.

IV:2 Håldiameter

Håldiametern är direkt beroende av brännvidden på linsen och laserns våglängd, då den fokuserade diametern d_0 minskar med minskad våglängd. Teoretiskt hade vi för CO_2 -lasern $d_0(f = 38 \text{ mm}) = 34 \mu\text{m}$
 $d_0(f = 127 \text{ mm}) = 114 \mu\text{m}$

Praktiskt är det minsta hål som kan borraras med CO_2 -laser omkring 0,1 mm i diameter. Önskar man större hål, kan man flytta bearbetningspunkten ut från fokuseringspunkten. Önskar man ännu större hål, finns det olika metoder. Man kan scanna strålen längs en cirkel över ett större område. Detta kan göras på olika sätt, antingen förflytta materialet eller strålen (t.ex. använda en roterande lins). Det finns även ett system, där man använder axiconlins, då man vill borra större hål. Om detta och om roterande lins står att läsa i [4].

IV:3 Håldjup

Håldjupet är beroende av laserstrålens energitäthet. En jämn energitäthetsfördelning ger ett brett men inte särskilt djupt hål. På bild 4 kan två hål studeras, där uteffekten från lasern varit densamma men i ena fallet har vi haft TEM_{00} mod (vänstra hålet) och i andra fallet multimod (högra hålet). Den ofokuserade stråldiametern D var i första fallet 3 mm och i andra fallet 15 mm.

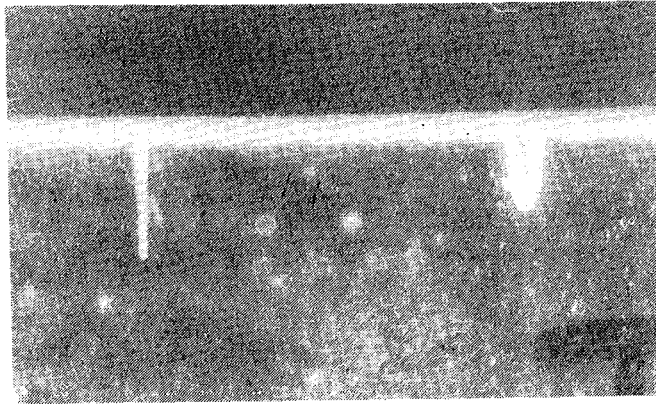


Bild 4

Håldjupet kan ökas genom att man ökar antalet pulser, om man samtidigt beaktar vad som sagts tidigare angående pulstid och tid mellan pulser. I diagram 2 har vi håldjupet i plexiglas som funktion av antalet pulser. Som synes växer håldjupet upp till ett visst antal pulser, medan en ytterligare ökning av antalet pulser ej har någon större verkan. I de flesta material kan man ändå uppnå rätt stora borrhjup p g a laserstrålen reflekteras flera gånger längs hålets sidor tack vare de stora infallsvinklarna. Se fig 9.

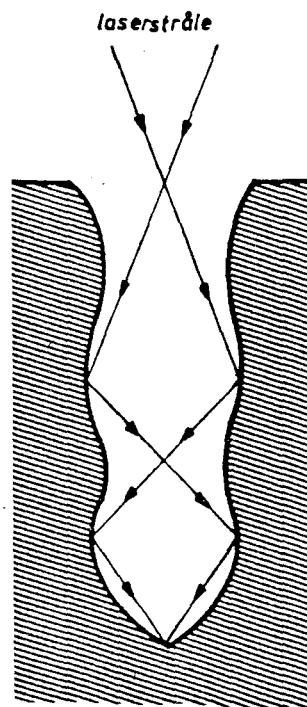


Fig 9

IV:4 Förhållande djup-diameter

Djup-diameter-förhållandet är beroende av pulslängd och effekt. Se fig 10. Hög effekt betyder mer förångat material vilket resulterar i ett bredare hål. Pulslängdens inverkan visas nedan. Vi har hållit effekten konstant och gjort hål med olika pulslängder. Se bild 5. Det vänstra hålet är gjort med 15 st 1/15 s pulser, det mittersta med 1 st 1 s puls och det högra med 1 st 1/15 s puls. Alla hålen är gjorda i samma plexiglasbit. Djup-diameter-förhållandet för det vänstra hålet är 10 och för det mittersta 7. Samtliga hål är gjorda med linsen $f=127$ mm. Laserns uteffekt var 20W.

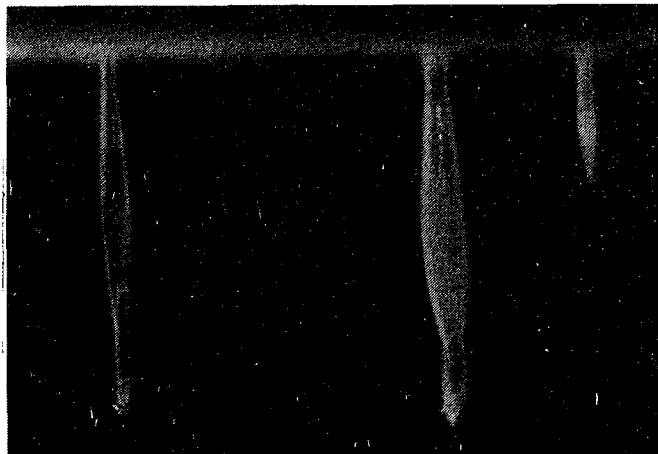


Bild 5

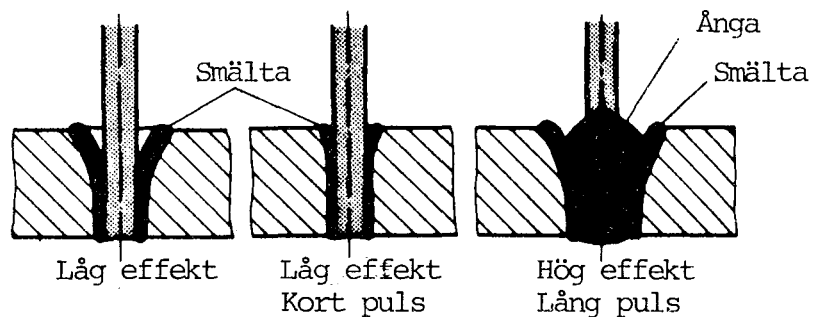


Fig 10

Om man använder tillräckligt många pulser, blir utgångshålet lika stort som ingångshålet. Detta beror på att ljuset reflekteras ner genom hålets sidor och därigenom kommer den nedersta delen av hålet att bestrålas kraftigast. Utgångshålets diameter blir större och större samtidigt som den i hålet avsatta energin blir mindre och mindre. Hålet kommer att stabiliseras. Borrar flera hål i ett material med varierande godstjocklek, kommer hålens in- resp. utgångshål att bli oberoende av godstjockleken, om bara tillräckligt antal pulser används [3]. Se fig 11.

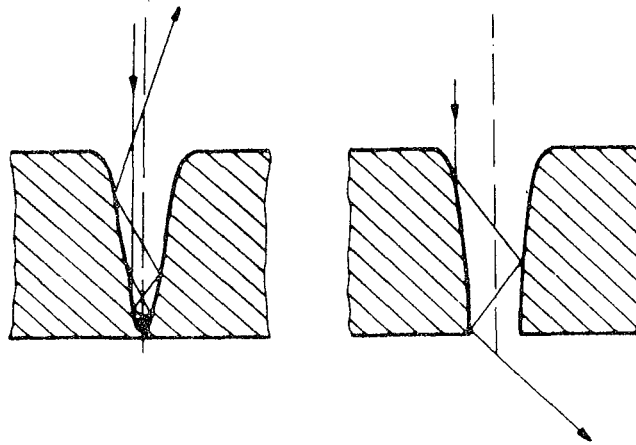


Fig 11

V SKÄRNING

I princip består ett laserskuret snitt av flera överlappande hål. Man kan därför beteckna laserskärning som borrar med relativ rörelse mellan ämnet och laserstrålen.

V:1 Historik

Skärning av material är ett viktigt tillämpningsområde för bearbetningslasern. Stora framsteg vad gäller skärhastighet och snittets kvalitet har gjorts de senare åren. CO₂-lasern är den mest använda lasern till skärning på grund av dess höga kontinuerliga utgångseffekt och stora absorption i de fasta icke-metallerna.

V:2 Processparametrar

De viktigaste parametrarna vid skärning är

1. Energitäthet
2. Linskaraktistik
3. Gasströmmen
4. Skärhastighet

V:3 Energitäthet

Med laserstrålning, som har god kvalitet (en ren mod) kan man teoretiskt koncentrera strålningen inom en yta med en diameter ungefär lika med strålningsvåglängden. Detta ger en enorm effekttäthet. En kontinuerlig CO₂-laser med en totaleffekt av 1 kW skulle teoretiskt få en effekttäthet i fokus på ca 1 GW/cm².

Energitätheten är direkt beroende av den använda lasern, den fokuserade diametern och skärhastigheten. Detta kan uttryckas

$$E \sim \frac{P}{dv}$$

E: Energitäthet

P: Laserns uteffekt

d: Ljusfläckens diameter på ämnet

v: Strålens relativa hastighet i förhållande till ämnet

Energitätheten kan ökas på två sätt vid givet v , antingen genom att man ökar laserns uteffekt eller genom att man minskar d .

V:4 Linskaraktistik

Man kan ändra brännvidden genom att byta lins och därmed också flytta brännpunktens placering. Fokuseringsdjupet b är en viktig parameter vid laser-skärning. Brännvidden påverkar ju både den fokuserade diametern och fokuseringsdjupet. Vi använde företrädesvis linsen med brännvidden $f = 127$ mm vid skärningsförsöken för att erhålla stort fokuseringsdjup.

V:5 Gasströmmen

Skärningsprocessens effektivitet ökar betydligt vid användande av en gasström genom dysan. Gasen ökar materialbortföringen och därmed sker en ökning av skärdjupet vid given hastighet. Man kan även bibehålla skärdjupet och få en ökning av hastigheten. I kapitlet om bearbetningsprocesser har gasströmmens betydelse och användning redan diskuterats. Bl.a. nämndes att man ofta använder syrgas vid skärning av metaller. Skälet till detta är främst:

- 1) Syret oxiderar metallytan varvid absorptionen stiger.
- 2) Det uppvärmda och smälta materialet oxideras och det utvecklas exotermisk reaktionsvärme (som hjälper till att hålla materialet smältande).
- 3) Gasströmmen bortför smält material.

Dysans utformning är viktig för gasströmmen. Efter litteraturstudium [1] kom vi fram till att ett konvergent-divergent munstycke (Lavalmunstycke) var bäst, då detta ger ett nästan konstant tryck oberoende av avståndet mellan dysans öppning och ämnet. I diagram 3 visas gastrycket som en funktion av avståndet mellan dysans öppning och ämnet för 3 olika utformningar av dysöppningen. [1].

V:6 Skärhastighet

Skärhastigheten och de ovan nämnda processparametrarna har stor betydelse för snittets kvalitet. Om skärhastigheten blir för liten för att kunna upprätthålla den önskade skärgeometrin (djup/bredd-förhållandet) så får man ändra effekttätheten. Skärhastigheten är i regel nedåt begränsat av att självförbränning uppstår och uppåt genom materialets tjocklek. (Kan ej uppnå tillräckligt skärdjup).

Några typiska skärhastigheter i icke-metalliska material med en 300 W CO₂-laser finns i fig 12.

Material	Tjocklek mm	Skärhastighet m/min
Akrylplast	3	3
Plywood	18	0,3
Gummi	3	5
Ylletyg	-	30
Tidningspapper	-	300
Papp	0,5	50

Fig 12. Några typiska skärhastigheter i icke-metalliska material med 300 W CO₂-laser.

Vi har gjort olika bestämningar av skärdjupet i plexiglas som funktion av skärhastigheten vid olika laser-effekter. Detta visas i diagram 4.

På följande bilder visas skärhastighetens effekt på det skurna snittets kvalitet. Överst syns en bild, där skärhastigheten varit låg. Snittytan har blivit ojämn och tendenser till att plexiglasen har börjat rinna kan ses. Den mellersta bilden visar en väl anpassad skärhastighet. En utvidgning vid in- resp. utgångssida kan dock ses. I det sista fallet har hastigheten varit för hög, ty vi har ej kommit igenom plexiglasbiten. (Bilden längst ned).

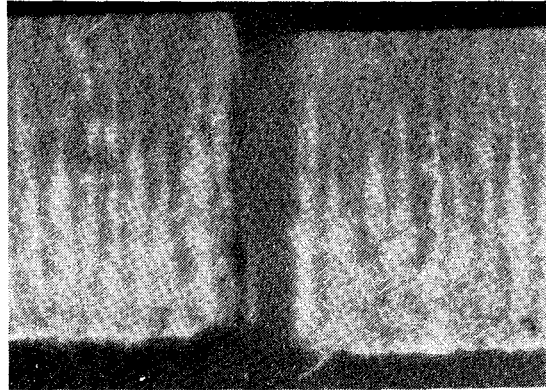


Bild 6

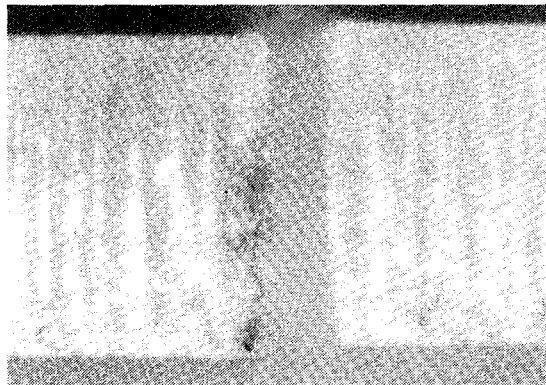


Bild 7

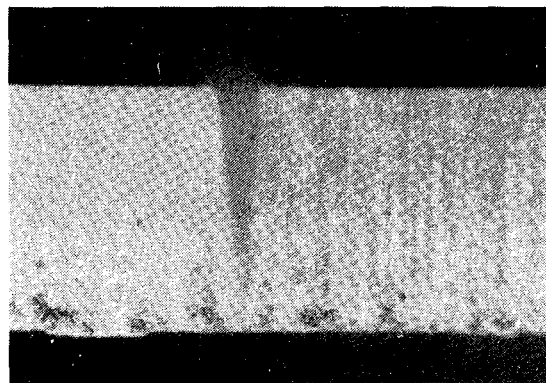


Bild 8

V:7 Polarisationsens inflytande på skärhastigheten

En faktor som inverkar på energiabsorptionen i det bearbetade materialet är polarisationen av laserljuset. Polarisationseffekten har störst inverkan på metaller som har hög reflektans vid rumstemperatur för infrarött ljus. Vi har ej undersökt detta, då vi ej sysslat med metaller eller kunnat påverka laserljusets polarisation. Vid försök med en planpolariserad laser har man kunnat påvisa en 20 gånger större absorption i snittets front vid skärning med polarisationen parallellt med snittet än om polarisationen var vinkelrätt mot detta. Man har kunnat höja skärhastigheten upp till 50 % tack vare detta. [1][3]

VI PROVER PÅ MATERIAL

Inom ramen för vårt examensarbete har vi även utfört försök åt industrier. Syftet har varit att utröna, huruvida lasermetoden skulle kunna användas i deras produktion.

VI:1 Glas

Skärprover har gjorts på glasfolie med tjocklek 5, 10, 20 och 40 μm . Vi fann vid våra prover, att skärhastigheten var omvänt proportionell mot tjockleken inom detta tjockleksintervall.

För glas av tjocklek av storleksordningen mm uppkom spänningar i glaset, vilket medförde att glaset sprack. En tänkbar lösning på detta problem skulle kunna vara att förvärma glaset till en temperatur, där det blir spänningsfritt.

VI:2 Trä

Att bränna in figurer eller bilder i trä är en relativt ny tillämpning av lasertekniken. Dels kan man, ovanpå trästycket man skall bränna i, lägga en kliché av något reflekterande material t.ex. koppar för att sedan scanna över ytan med laserstrålen. En annan metod är att låta strålen beskriva den kurvform, som man vill bränna in. Den sist nämnda metoden förutsätter en datorstyrd eller numeriskt styrd förflyttning av arbetsstycket för att vara effektiv. Vi använde oss av klichémetoden för att göra tavlor.

Gränsen för vad som gav en snygg bränd yta blev 3 J/mm^3 .

VI:3 Bergarter

Laser kan användas till att borra, skära eller ritsa i bergarter.

VI:4 Slipmaterial

Då man skär slipmaterial som t.ex. smärgel- eller putsduk med konventionell teknik slits skärverktygen mycket fort ned. Vi har utfört skärprover på olika typer av slipmaterial och funnit, att lasertekniken

ur teknisk synvinkel är överlägsen konventionell teknik. Den ger ett mycket gott snitt samtidigt som någon mekanisk förslitning inte äger rum.



Bild 9. Sten (granit) med ett laserborrat hål samt en rits tvärsöver.

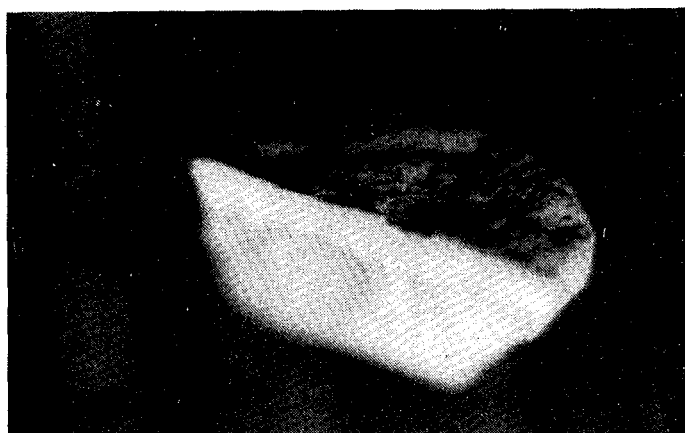


Bild 10. Sten som efter en rits har spruckit itu. Den vita randen i sprickytan visar var laserstrålen bränt.

VII Utvecklingsmöjligheter

Avslutningsvis vill vi peka på några olika möjligheter att ytterligare komplettera fysikinstitutionens CO₂-laser med avseende på materialbearbetning. Det är särskilt tre saker som vi anser vara av stor vikt, vilka redovisas nedan.

- * Mycket av laserbearbetning sker numera med pulsad laser, så det vore önskvärt även detta ordnades för denna CO₂-laser.
- * Möjlighet till att lätt kunna styra bearbetningsbord i både x- och y-led med hög precision under bearbetningsprocessen skulle öka användningsområdet avsevärt. Till detta behövs ytterligare en stegmotor med tillhörande kringutrustning. Man kan i detta fall tänka sig en vidareutveckling med styrning med hjälp av en mikrodator.
- * Skyddsgasens utströmningshastighet från dysan är en viktig parameter vid viss bearbetning. En flödesmätare till detta har hög prioritet vad det gäller anskaffning av materiel.

Då vi har gjort en del mindre arbeten åt industrin, har vi funnit, att detta har varit mycket lärorikt och upplysande om de problem som kan uppstå vid olika typer av materialbearbetning rent allmänt, och med laser i synnerhet. Vi hoppas, att denna kontakt skall fortsätta även i framtiden samtidigt som vi också hoppas, att CO₂-lasern skall få användning internt vid bl.a. laborationskurser o.dyl.

UPPSTART AV CO₂-LASER

1. Öppna vattenkranarna för kylning av urladdningsrör, speglar och elektroder, kontrollera att systemet är tätt (tätningar kan under längre stillestånd torka ihop och därmed ge upphov till läckage).
2. Kontrollera att vridtransformatorn på spänningsaggregatet är i nolläge.
3. Slå till huvudströmbrytaren.
4. Starta vakuumpump och öppna ventilen.
5. Kontrollera att regulatorventilerna är stängda (vänster varv).
6. Öppna flaskventilerna.
7. Ställ in 1 bar m h a reducerventilerna.
8. Ställ in önskat flöde med nålventilerna.
9. Reglera till önskat totaltryck med pumpventil.
10. Kontrollera att strålgångsslutaren är i stängt läge.
11. Ta på skyddsglasögon.
12. Vrid upp spänningen tills urladdningen tänder.
13. Öppna skyddsgasventil.

STOPP AV CO₂-LASER

1. Stäng av skyddsgasen.
2. Vrid ner spänningen till noll.
3. Ta av skyddsglasögon.
4. Stäng flödesventilerna. (Dra ej åt nålventilerna mer än nödvändigt!)
5. Stäng flaskventilerna.
6. Stäng pumpventil.
7. Slå av vakuumpump.
8. Efter 5 min. stäng kylvattenkranarna.

Förteckning över diagram

- Diagram 1: Håldjup i plexiglas som funktion av avståndet från fokus för två linser med $f = 38$ mm resp $f = 127$ mm.
Stråldiameter = 15 mm
Multimod
- Diagram 2: Håldjup i plexiglas som funktion av antalet pulser för olika lasereffekter. Varje puls är 1 sekund.
 $f = 127$ mm
Stråldiameter = 15 mm
Multimod
- Diagram 3: Trycket som funktion av avståndet för tre olika typer av dysor.
- Diagram 4: Skärdjupet i plexiglas som funktion av skärhastigheten för olika effekter.
 $f = 127$ mm
Stråldiameter = 15 mm
Multimod
- Diagram 5: Skärdjupet i plexiglas som funktion av skärhastigheten för olika effekter.
 $f = 127$ mm
Stråldiameter = 3 mm
TEM₀₀-mod

Diagram 1

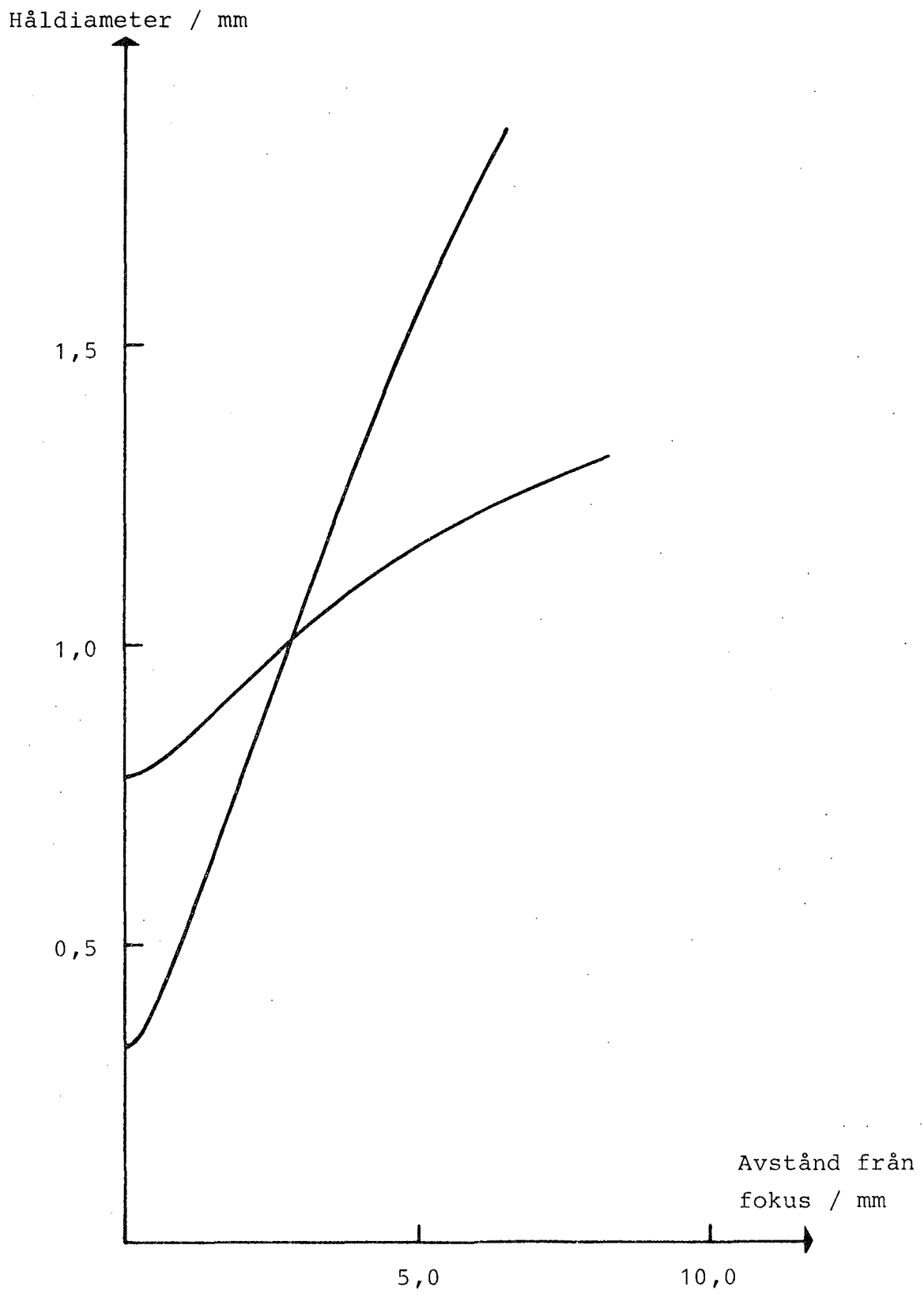
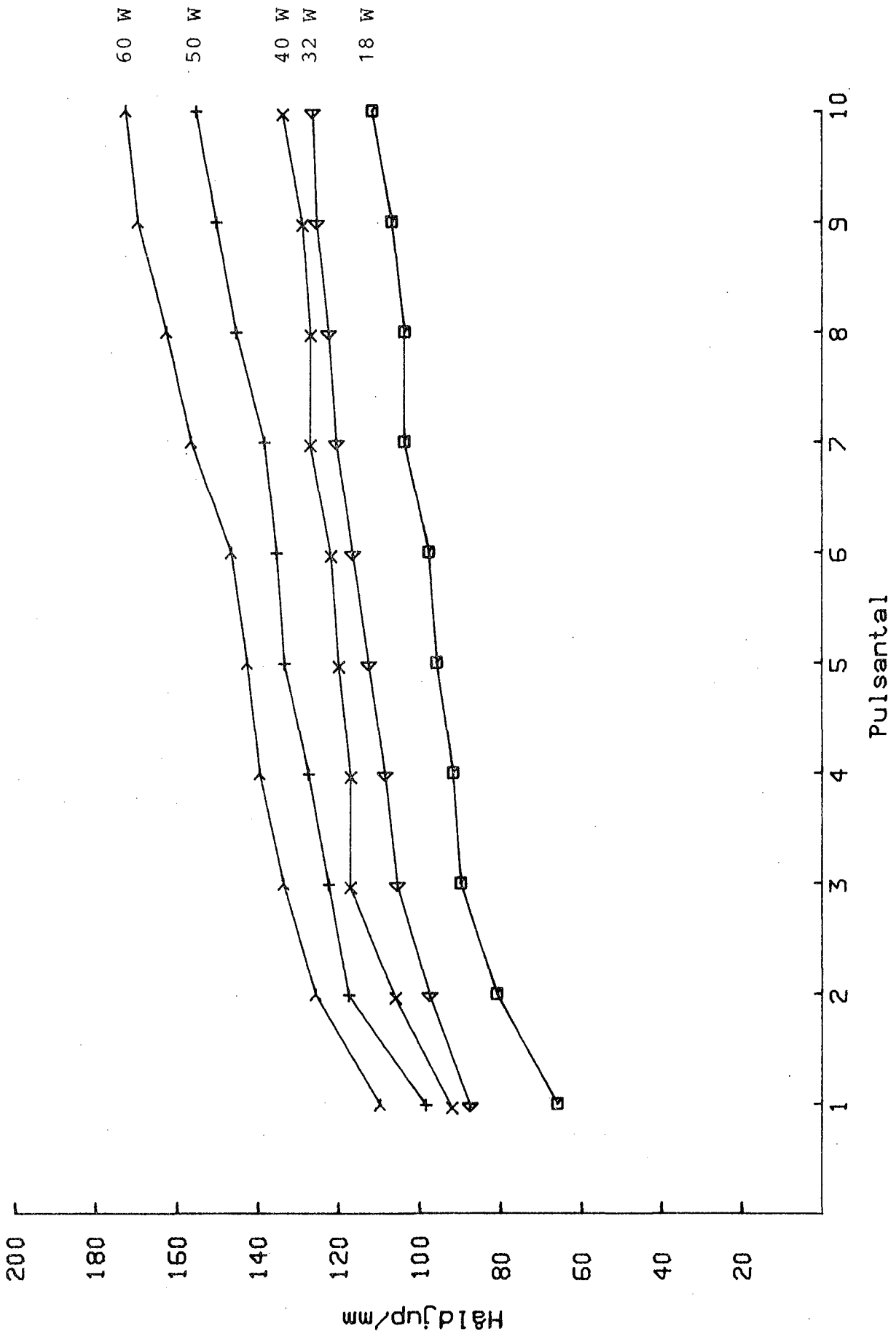
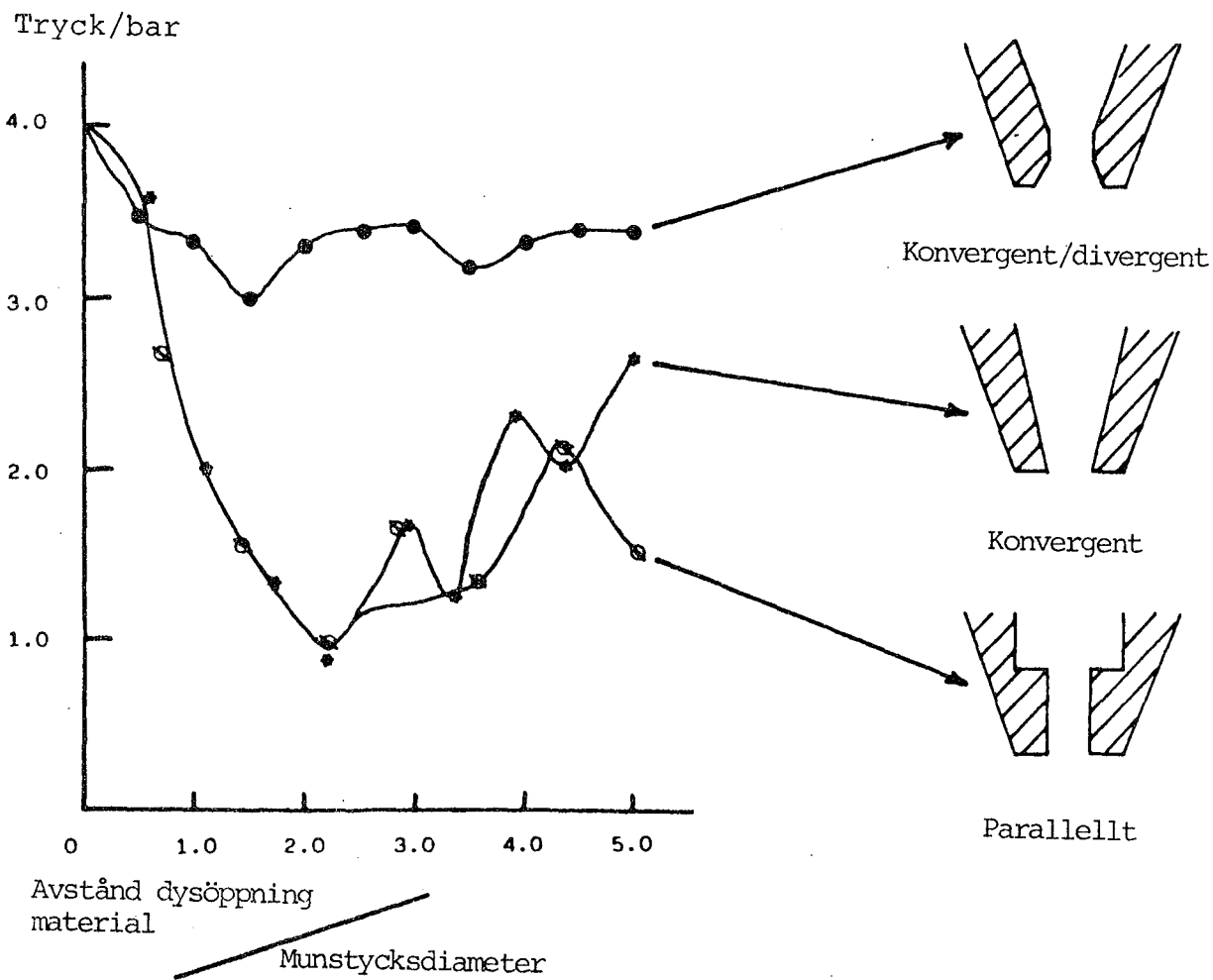


Diagram 2





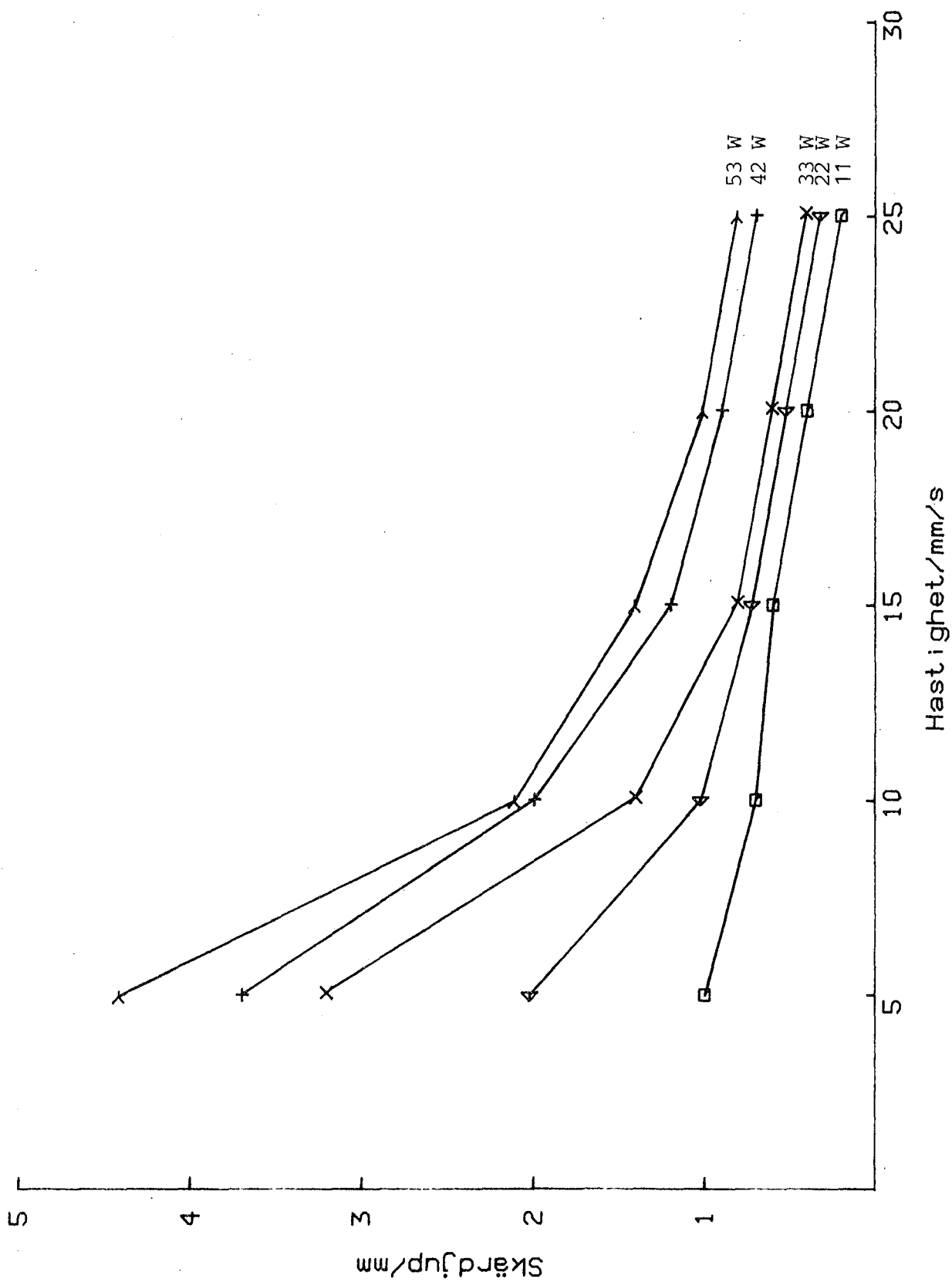
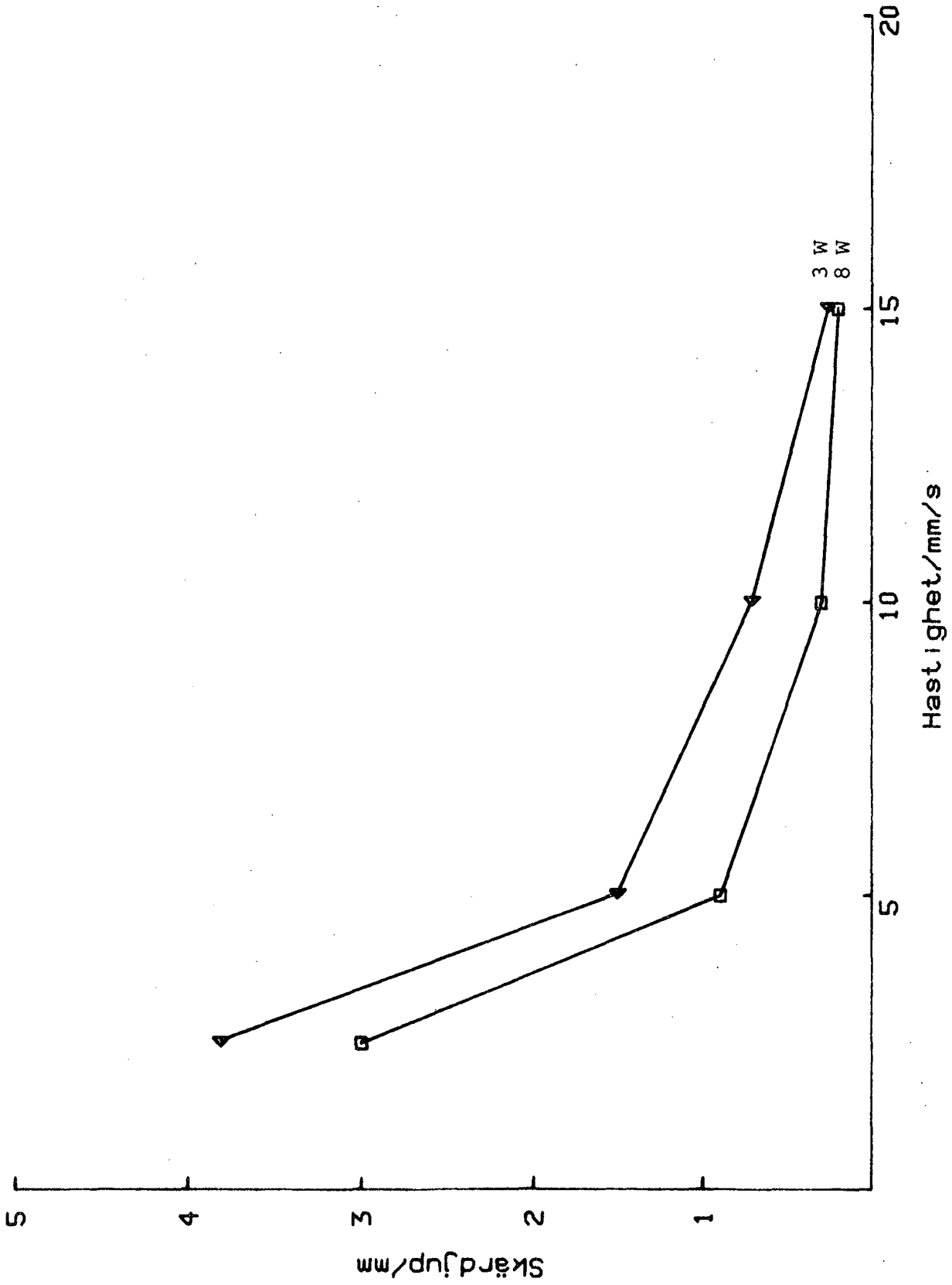


Diagram 5



Referenser

1. Ingenjörsvetenskapsakademien, Rapport 195, Laserbearbetningsteknik, Stockholm 1981, sid 51.
2. Bela A Lengyel, Lasers, Second edition, Wiley and Sons 1971, sid 65 - 75.
3. Flemming Ove Olsen, Studier af reflektionsforhold ved laserbearbejdning, Lyngby 1981, sid 134 - 138, 215 - 216.
4. Sven-Olov Roos, Optiksystem vid laserbearbetning, Göteborg 1981.