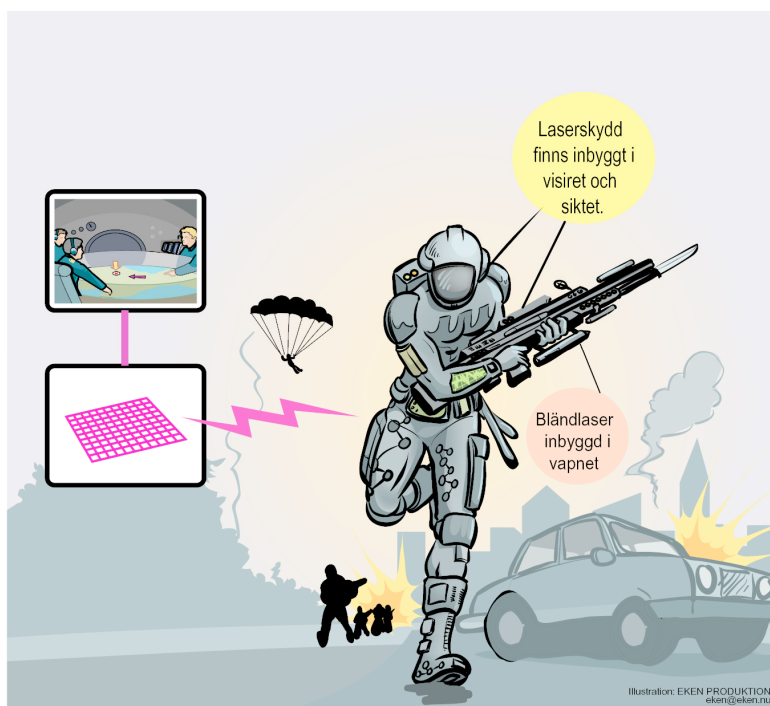


Skydd mot laser - en introduktion

Hans Kariis och Sören Svensson



TOTALFÖRSVARETS FORSKNINGSINSTITUT

Sensorteknik

Box 1165

581 11 Linköping

FOI-R--0266--SE

November 2001

ISSN 1650-1942

Användarrapport

Skydd mot laser - en introduktion

Hans Kariis och Sören Svensson

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Sensorteknik Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, FOI-R--0266--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 6. Telekrig	
	Månad, år November 2001	Projektnummer E3021
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 61 Telekrigföring med EM-vapen och skydd	
Författare/redaktör Hans Kariis Sören Svensson	Projektledare Sören Svensson	
	Godkänd av	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarmakten	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt Hans Kariis	
Rapportens titel Skydd mot laser - en introduktion		
Sammanfattning (högst 200 ord) Rapporten ger en introduktion till området skydd mot laser. Laserns historia och funktion beskrivs kort. Exempel på farliga, huvudsakligen militära, lasersystem och de skador dessa kan åstadkomma presenteras. Den internationella konvention som förbjuder ögonskadande lasrar diskuteras. Olika typer av skydd mot laser redovisas, med utgångspunkt från den forskning som bedrivs inom området på FOI.		
Nyckelord Laser, skydd, ögonskada, antisensorlaser		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 45 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista Sekretess	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Sensor Technology P.O. Box 1165 SE-581 11 Linköping	Report number, ISRN FOI-R--0266--SE	Report type User report
	Research area code 6. Electronic Warfare	
	Month year November 2001	Project no. E3021
	Customers code 5. Contracted Research	
	Sub area code 61 Electronic Warfare, Electromagnetic Weapons	
Author/s (editor/s) Hans Kariis Sören Svensson	Project manager Sören Svensson	
	Approved by	
	Sponsoring agency Swedish Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible Hans Kariis	
Report title (In translation) Introduction to Laser Protection		
Abstract (not more than 200 words) This report gives an introduction to the field of laser protection. The history and physics of the laser is briefly described. Some examples of hazardous, mainly military, laser systems and the damages they may cause are presented. The international convention, prohibiting eye-damaging lasers, is discussed. Different kinds of protection devices are described, primarily from the research at FOI.		
Keywords Laser, protection, eye injury, anti sensor laser		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 45 p.	
	Price acc. to pricelist Security classification	

Innehållsförteckning

1	FÖRORD	6
2	LASER, EN KORT INTRODUKTION	6
2.1	HISTORIA	6
2.2	PRINCIP	7
2.3	ÄNDRING AV LASERVÅGLÄNGDEN	9
2.4	TILLÄMPNINGAR	11
2.5	LASERSÄKERHET.....	11
3	LASERSKADOR.....	12
3.1	JÄMFÖRELSE MELLAN OLIKA LJUSKÄLLOR.....	12
3.2	ÖGATS BYGGNAD OCH FUNKTION	12
3.3	ÖGONSKADOR.....	14
3.4	REGLER OCH FÖRESKRIFTER	17
3.5	"ÖGONSÄKER" LASER	17
3.6	SKADOR PÅ TEKNISK UTRUSTNING	18
3.7	BLÄNDNING	18
4	HOTET - MILITÄRA LASERSYSTEM IDAG OCH I FRAMTIDEN	20
4.1	VÅGLÄNGDSOMRÅDEN	20
4.2	STÖDFUNKTIONSLASRAR	20
4.3	HÖGENERGILASRAR.....	22
4.4	ÄNTISENSORLASRAR.....	22
5	SKYDD MOT LASER	24
5.1	FOLKRÄTTSLIGA SKYDD.....	25
5.2	TAKTISKA SKYDD.....	27
5.3	TEKNISKA SKYDD.....	28
5.4	AKTIVITETER PÅ FOI	40
6	ORDLISTA	42
7	FÖRKORTNINGAR.....	43
8	FIGURFÖRTECKNING	44
9	REFERENSER	45

1 Förord

I takt med den ökande laseranvändningen, både civilt och militärt, ökar också behovet av kunskap om och skydd mot laserns skadeverkningar. Att kunna lösa sin uppgift trots ett laserhot är en svår utmaning, som kräver avancerad teknik. Denna skrift är tänkt som en introduktion till ämnet för dem som för första gången kommer i kontakt med farliga lasrar. Rapporten är inte speciellt teoretisk, utan exempel ur verkligheten använd för att beskriva laser och laserskydd snarare än teoretiska modeller. Den teoretiska nivån förutsätter att läsaren har gymnasiekunskaper i fysik och matematik. Omslagsbilden, tecknad av Martin Ek och modifierad av Christina Nilsson, föreställer en framtidsvision av militär laseranvändning, cirka 2020. Laser förekommer då i stor omfattning och skydd mot laser är en naturlig del i soldatens personliga utrustning.¹

2 Laser, en kort introduktion

2.1 Historia

Tankar kring en intensiv, riktad och frekvensstabil elektromagnetisk strålningskälla föddes ur Einsteins teori för stimulerad emission (1917). Principen för stimulerad emission innebär att ett elektromagnetiskt vågpaket (foton) absorberas av en elektron, som därmed övergår till ett högre energitillstånd och därefter avger en foton i samma riktning och med samma fas som den infallande fotonen. Kravet på stimulerad emission är att den yttre fotonen ska ha exakt rätt energi svarande mot skillnaden mellan det exciterade tillståndet och grundtillståndet.

Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) realiserades experimentellt 1960 av Dr. Theodore H. Maiman vid Hughes Research Labs, figur 1. Genom att använda en korkskruvsliknande blixtlampa runt en stav av rubin kunde Maiman excitera kromatomerna i rubinen till ett högre tillstånd. De exciterade atomerna stimulerades sedan att avge och förstärka fotoner i en bestämd riktning genom att rubinstavens båda ändtytor var försilvrade.²



Figur 1 Theodore Maiman med sin första rubinlaser, 1960. Foto: Hughes Aircraft

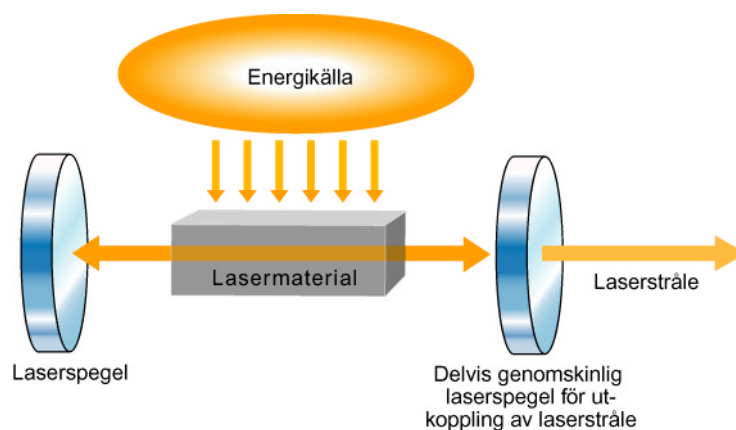
2.2 Princip

Laserstrålning skiljer sig från vanlig optisk strålning på fyra olika sätt, nämligen genom att den är **enfärgad** (monokromatiskt), **parallell**, **koherent** (dvs ligger i fas) samt kan vara **intensiv**.

För att en laser ska fungera måste allmänt sett tre förutsättningar vara uppfyllda:

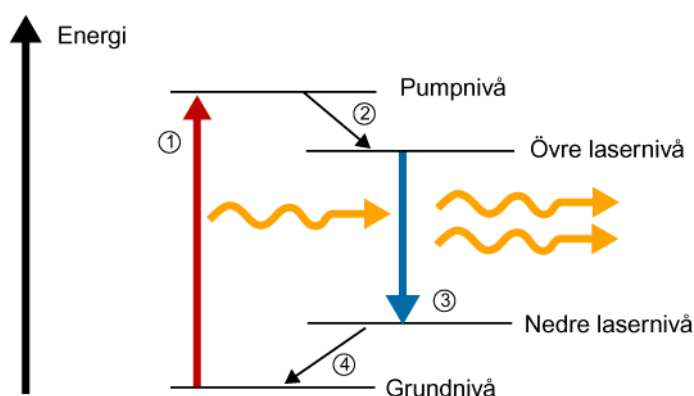
- En resonator, även kallad kavitet, måste finnas.
- Ett lasermedium, med lämpligt placerade energinivåer, måste finnas.
- Vi måste ha tillfört energi så att det skapats populationsinversion, dvs fler elektroner i den högre lasernivån än i den lägre.

En kavitet, där resonans kan uppstå när ljus reflekteras fram och tillbaka kan byggas upp av två speglar mitt emot varandra. För att få ut laserljus ur kaviteten görs den ena spegeln halvgenomskinlig, se figur 2.



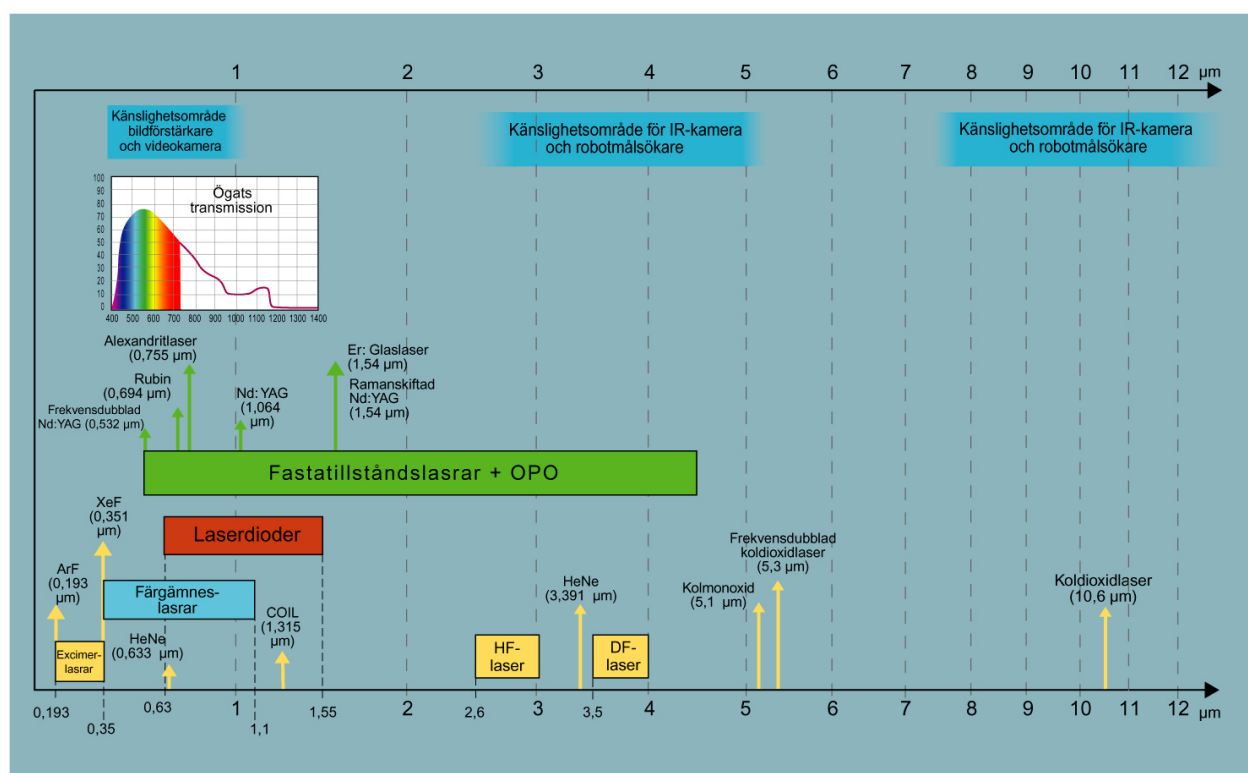
Figur 2 En lasers uppbyggnad. De två mot varandra riktade speglarna utgör här kaviteten. Teckning: Martin Ek

Stimulerad emission kan uppstå i ett medium där fler elektroner befinner sig i ett övre energitillstånd än i ett nedre, s k populationsinversion. Detta tillstånd skapas genom en process som kallas pumpning. Lasermaterialet absorberar pumpenergi och exciteras till pumpnivån (1, i figur 3). Detta tillstånd har kort livslängd och elektronen relaxerar snabbt till övre lasernivån (2). Energittillförseln kan ske elektriskt, som i en diodlaser, optiskt, som i en blixtlampspumpad laser eller kemiskt, som i t ex en syre-jod-laser. När elektronerna lyfts upp till den övre lasernivån, som har avsevärt längre livslängd, ligger de kvar där tills en inkommande foton stimulerar en relaxation och därmed emission av ytterligare en foton(3). Den på så vis emitterade fotonen kommer att ha samma våglängd, riktning och fas som den inkommande fotonen. Den genererade fotonen kan i sin tur stimulera emission av ytterligare en foton från en annan exciterad atom. Detta är den ljusförstärkande processen i lasermaterialet. Från nedre lasernivån relaxerar elektronen snabbt ner till grundtillståndet (4). Relaxationerna (2) och (4) sker utan emission av fotoner och motsvarande energi förloras istället som värme i materialet.³



Figur 3 Energinivådiagram Teckning: Martin Ek

Efter den första rubinlasern har ett otal lasrar utvecklats med emission från röntgenområdet till mm-vågsområdet, se figur 4. Lasrar kan skilja sig enormt i fysisk storlek och prestanda, från halvledar-lasrar med några 10-tals μm utsträckning och emitterad effekt i μW -området, till lasrar för kontrollerad fusion som kan generera pulseffekter på flera TW ($1 \text{ TW} = 10^{15} \text{ W}$). Beroende på lasermedium så klassas lasrar i kategorierna: fasttillståndslasrar, gaslasrar, halvledarlasrar och vätskelasrar.



Figur 4 Några vanligt förekommande lasrar i det elektromagnetiska spektrat. Teckning: Martin Ek

När det gäller laserns funktion skiljer man på *kontinuerlig* och *pulsad* laser. En kontinuerligt emitterande laser har en uppbyggnad med kontinuerlig pumpning och lasereffekten är i det ideala fallet konstant i tiden. Den kontinuerliga lasern kan moduleras, det vill säga uteffekten varierar som funktion av tiden. Uteffekten anges i watt.

En pulsad laser genererar laserstrålning i form av korta pulser med pulslängd från några femtosekunder till flera millisekunder. Hos en pulsad laser anges pulsenergin i enheten joule och pulsrepetitionsfrekvensen i hertz. En pulsad laser kan generera extremt höga toppeffekter om pulslängden

är kort (mindre än en nanosekund). Medeleffekten från en pulsad laser erhålls som energiinnehållet i laserpulsen multiplicerad med pulsrepetitionsfrekvensen.

Ett vanligt sätt att nå avsevärt högre pulseffekt är s.k. ”Q-switchning”. Här används en optisk komponent, Q-switch, vilken ger möjlighet att styra transmissionen av laservåglängden på ett kontrollerat sätt. Q-switchen placeras i resonatorn tillsammans med lasermaterialet som pumpas så att hög populationsinversion erhålls. Under tiden pumpningen sker befinner sig Q-switchen i ett läge med låg transmission för laservåglängden. Återreflekteringen från laserspeglarna till lasermaterialet är nu avstängd, och laseroscillationen förhindras att sätta igång. När lasermaterialet har uppnått maximal populationsinversion ändras Q-switchens egenskaper snabbt så att emitterade fotoner kan passera och laseroscillationen kan komma igång. Nu finns det en stor mängd energi tillgänglig och lasermaterialets höga förstärkning ser till att en laserpuls med hög toppeffekt genereras. När lasermaterialet tömts på energi stängs Q-switchen och pumpningen återupptas.

En avgörande egenskap för att detta ska fungera effektivt är att den övre lasernivån har tillräckligt lång livslängd. Detta innebär att man under en tid som är av samma storleksordning som övre nivåns livslängd kan pumpa materialet och skapa en populationsinversion. Energin lagras på detta sätt i materialet. När Q-switchen öppnas kopplas energin snabbt ut under en tid som är avsevärt kortare än livslängden på den övre nivån. Det är denna funktion som ger hög toppeffekt i laserpulsen. Pulslängden vid Q-switchning beror på lasermaterialet och varierar oftast mellan 1 ns och 1 μ s. Den maximala uteffekten i pulsen kan bli mycket hög, värden på 10 kW - 10 MW är vanligt förekommande.³

2.3 Ändring av laservåglängden

Ett lasermaterial kan även ha ett flertal laserövergångar som motsvarar olika laservåglängd. Vilken våglängd som förstärks kan väljas genom att styra våglängden för det återreflekterade ljuset till lasermaterialet. En sådan laser har avstämbar våglängd. Styrning av våglängden i återreflektionen kan t.ex. ske genom att använda ett prisma eller ett gitter i resonatorn.

2.3.1 Frekvenskonvertering

När en intensiv laserstråle passerar genom ett material, växelverkar strålens elektriska fält med materialets inre elektriska fält. Om denna växelverkan är linjär påverkas inte ljusets frekvens. Om växelverkan är olinjär kan t.ex. en överton bildas som ger upphov till dubbling av laserfrekvensen (halvering av laservåglängden). Detta kan ske med upp till 80% verkningsgrad. Frekvensdubbling är en fix våglängdskonvertering från längre till kortare våglängd.

På motsvarande sätt kan två längre våglängder genereras där summan av frekvenserna är lika med den ursprungliga laserfrekvensen. Denna process kallas parametrisk generation och har allmänt låg verkningsgrad. Om konverteringen förstärks med hjälp av en optisk resonator kan användbar effektivitet nås. Detta kallas Optisk Parametrisk Oscillation (OPO). Genom att välja utbredningsriktning i den optiskt olinjära kristallen kan man nästan godtyckligt välja vilka våglängder som laserstrålen ska konverteras till. Både kontinuerlig och pulsad laserstrålning kan våglängdskonverteras med optiskt icke linjära kristaller.³

I tabell 1 sammanfattas några vanligt förekommande lasrar.

Lasermaterial	Pumpning	Våglängd	Funktion	Uteffekt/energi
Gaslaser				
Koldioxid CO ₂	Elektrisk urladdning eller RF fält Gasdynamisk expansion	Avstämbar 9-11 µm	Kontinuerlig eller modulerad via pulsad pumpning, 1 µs-100 ms pulslängd	< 10 kW cw < 500 W toppeffekt pulsad <1 MW under kort tid, Gas.dyn. pumpning
Vätefluorid-Deuteriumfluorid (HF-DF)	Elektrisk urladdning DC eller puls Gasdynamisk expansion	2,6-3,5 µm (HF) 3,5-4,1 µm (DF)	Kontinuerlig eller pulsad med 100-300 µs pulslängd	50 mW cw <500 mJ pulsad <1 MW, Gas.dyn. pumpning
Kemisk Syre-Jod laser (COIL)	Gasdynamisk expansion	1,315 µm	Kontinuerlig	<10 MW under kort tid (några sekunder)
Vätskelaser				
Färgämne löst i vätska	Optisk pumpning med blixtlampa eller annan laser	Avstämbar från 0,35 µm till 1,1 µm med olika färgämnen	Kontinuerlig eller pulsad	<500 mW cw < 500 mJ pulsad
Halvledarlaser				
AlGaInP	Elektrisk ström	0,63-0,69 µm	Kontinuerlig	< 4 W
GaAlAs	Elektrisk ström	0,78-0,86 µm	Kontinuerlig eller pulsad	< 300 W cw <1600 W pulsad
InGaAs	Elektrisk ström	0,91-1,1 µm	Kontinuerlig eller pulsad	< 4 W cw
InGaAsP	Elektrisk ström	1,550 µm	Kontinuerlig	<200 mW cw
Kristall-glaslaser				
Nd:YAG	Optisk pumpning med blixtlampa eller laserdioder	1,064 µm	Kontinuerlig eller pulsad med Q-switch, 5-20 ns pulslängd	<150 W cw < 5 J pulsad
Er:Glas	Optisk pumpning med blixtlampa	1,54 µm	Pulsad med låg prf, Q switch 10 ns pulslängd	<100 mJ lång puls <10 mJ Q-switch
Tm:YAG	Optisk pumpning med laserdioder	2,01 µm	Kontinuerlig eller pulsad med Q-switch, 100-500 ns pulslängd	<2 W cw <20 mJ pulsad Q-switch

Tabell 1 Exempel på några lasertyper

2.4 Tillämpningar

Lasrar används i många civila tillämpningar, som CD-spelare, hastighetsmätning av fordon, avståndsmätning, utpekning mm.

I sensortillämpningar utnyttjas laser t.ex. för avståndsmätning, vibrationsanalys, holografisk avbildning, fjärranalys av luft, mark och vatten samt som en extremt känslig mätprob i olika medicinska, tekniska och vetenskapliga sammanhang.

Laserns förmåga att generera höga lokala energitätheter utnyttjas t.ex. för materialbearbetning, i tryckeribranschen, i medicinska tillämpningar, för datalagring etc. Utvecklingen av kompakta högenergilasrar med hög tillförlitlighet styrs nästan uteslutande av industriella behov inom materialbearbetningsområdet.

Det största genomslaget har dock lasertekniken fått i och med halvledarlasern och dess användning inom informationsteknologi och telekommunikation. Varje sekund installeras 1 km nya optiska fiber för kommunikation världen över och lasrar genererar och förstärker signalerna i dessa. Idag går 90% av all transkontinental teletrafik i USA via optisk fiber. För att möta framtida behov kommer det att krävas med kostnadseffektiva lösningar för transmission, switchning, datalagring och displayer. Lasern kommer även att få omfattande tillämpningar inom presentationstekniken från "VR-glasögon" (VR=Virtual reality, virtuell verklighet) till laserprojektorer för ljusstark vägg-presentation.

2.5 Lasersäkerhet

Det allra viktigaste är att göra en korrekt riskavståndsbedömning innan man använder en laser. Det är också mycket viktigt att utbilda alla som handskas med laser så att de är medvetna om riskerna och att de är motiverade att använda säkerhetsutrustning. Låt aldrig någon person utan laserutbildning handskas med ögonfarlig laser! Det är viktigt att avskärma så stor del av strålgången som möjligt så att strålen inte kan träffa något öga. Man bör tänka på att aldrig föra in speglade föremål i strålgången (armbandsur, ringar mm). Reflexer från glasytor (exempelvis fönster) och användning av förstörande optik ökar också riskerna och bör undvikas.

Dämpfilter är en vanlig säkerhetsåtgärd vid användning av ögonfarliga lasrar. Beroende på tillämpning kan dessa dämpfilter sättas direkt på lasern eller i speciella skyddsglasögon. Dämpfiltren skyddar vanligen mot ett antal specificerade våglängdsband, medan de har hög transmission i andra våglängdsband. På så sätt kan omvärlden betraktas trots att laserstrålen dämpas kraftigt om den skulle råka riktas mot ögonen.

3 Laserskador

Den höga ljusintensitet som kan framkallas med laser medför att ett absorberande material som träffas av en laserstråle värms upp. Denna uppvärmning kan bli så kraftig att materialet skadas. Speciellt stor risk för skada föreligger om materialet sitter i ett fokuserande system, som näthinnan i våra ögon eller detektorer i optiska instrument. I ögat kan uppvärmningen ge upphov till sönderslitande tryckstötter och även andra skademekanismer förekommer.

3.1 Jämförelse mellan olika ljuskällor

Tabell 2 ger en ungefärlig jämförelse mellan den exponering olika ljuskällor ger. Exponeringen anges i enheten MTE, vilket är den av Arbetsmiljöverket maximalt tillåtna exponeringen.⁴ Avståndet till ljuskällorna är 1 m (utom för solen). För de fyra översta ljuskällorna antas att blinkreflexen aktiveras efter 0,25 s. De tre mittersta ljuskällorna kan endast anses ögonsäkra vid korta exponeringstider. Det framgår klart att till och med en tämligen ordinär avståndsmätarlaser är oerhört mycket farligare än andra optiska strålkällor.

Ljuskälla	Exponering
• Matt glödlampa	0,0001 MTE
• Kolljusbåge	0,1 MTE
• Solen	0,7 MTE
• Laserpekinne (effekt 0,5mW, stråldiameter 1mm, divergens 3mrad)	0,5 MTE
• Avståndsmätarlaser (1 MW, Ø = 2 cm, divergens 2 mrad, 30 ns pulser)	2000 MTE

Tabell 2 Jämförelse mellan ljuskällor

Många olika faktorer påverkar skadekänsligheten och därmed den maximalt tillåtna exponeringen: Våglängd, pulslängd, pulsenergi/irradians och exponeringstid är de viktigaste.

3.2 Ögats byggnad och funktion

I ögat fokuseras inkommande ljus på näthinnan, där intensiteten blir avsevärt högre än det infallande ljusets intensitet. Synen är det sinne som ger den största mängden information till hjärnan. Ett synhandikapp medför följaktligen en allvarlig försämring av individens situation både ekonomiskt och socialt. Ögonen är kanske därför en av de kroppsdelar som man instinktivt i första hand försöker skydda mot skador.

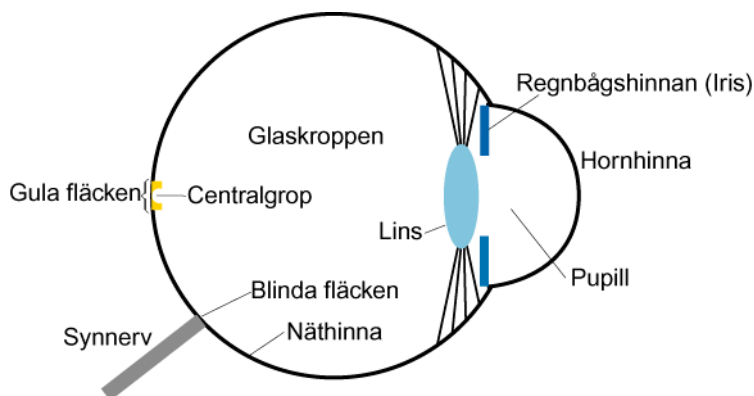
I figur 6 visas en schematisk bild av ett öga. Hornhinnan och linsen tillsammans ger en fokusering av inkommande ljus till en bild på ögats bakre vägg. Väggen täcks av näthinnan som innehåller speciella synceller vilka reagerar på belysningen och sänder signaler längs nervknippen till syncentrum i hjärnan. Två områden av näthinnan är speciellt intressanta: gula fläcken och blindfläcken:

Gula fläcken innehåller fler synceller per ytenhet än någon annan del av ögat. Här finns också de flesta färgreceptorerna. Centralgropen i gula fläcken är centrum för skarpseendet. När blicken fästes på ett föremål hamnar bilden av föremålet på den gula fläcken. Övriga delar av näthinnan ger endast begränsad

information till synsinnet (grova positionsangivelser och information om rörelser i scenen). Att vi upplever oss se stora delar av omgivningen hela tiden beror på hjärnans förmåga att skapa och upprätthålla en modell av omvärlden utifrån den begränsade information som synsinnet tillhandahåller.

Blinda fläcken är knutpunkt för alla nerver från olika delar av näthinnan. Här samlas nervknippena ihop till en stor synnerv som går ut ur ögat. På grund av detta finns här inte plats för några synceller och bilder som faller på denna del av näthinnan kommer inte att uppfattas av hjärnan. Beroende på att hjärnan arbetar med en modell av omvärlden är vi vanligen inte medvetna om att vi har en lucka i synfältet i ögats blindas fläck. Under näthinnan ligger åderhinnan som med sitt finmaskiga nät av blodkärl näringsförsörjer och syrsätter näthinnan.

Vävnaden inuti ögat tål, approximativt, lika hög strålningsintensitet som huden. Huvudanledningen till att ögonskador är en speciell risk i samband med laserstrålning är att hornhinnan och linsen fokuserar strålningen på näthinnan. Intensiteten ökar då typiskt ca 200 000 ggr jämfört med intensiteten framför hornhinnan se figur 5.

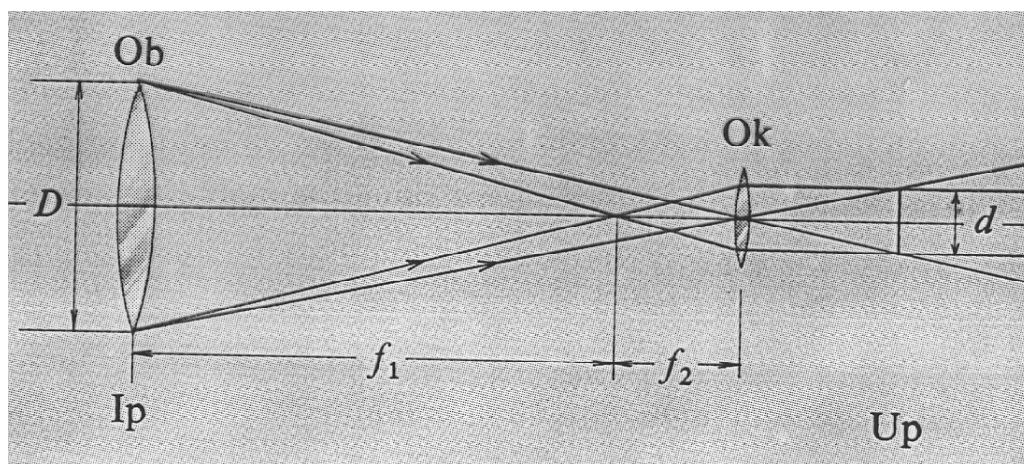


Figur 5 Ögats byggnad Teckning: Martin Ek

Ögats förmåga att samtidigt urskilja ljusa och mörka partier i en scen är bättre än de flesta tekniska sensorers. Ändå räcker inte detta för att ge godtagbar information vid olika belysningsförhållanden under dag och natt. Genom att bl a förändra de kemiska reaktionerna i syncellerna kan ögat avsevärt höja sin känslighet i mörker. Denna anpassning (adaption) påbörjas automatiskt i mörker och tar tiotals minuter i anspråk. En exponering för starkt ljus förstör omedelbart adaptionen som därefter måste påbörjas igen.

3.2.1 Kikare och annan fokuserande optisk utrustning

Användning av optiska instrument som kikare och sikten kan öka risken för ögonskada. En typisk kikarkonstruktion visas i figur 6. En parallell laserstråle som infaller längs den optiska axeln och fyller ut hela objektivdiametern D fokuseras på avståndet f_1 från objektivet. Hela strålen träffar okularet och kollimeras till en parallell utträdesstråle med diametern d . Genom att betrakta figurens likformiga trianglar med höjd f_1 respektive f_2 inses att kikarens förstoring $G = (f_1 / f_2) = D/d$. För att ge optimala mörkerprestanda bör kikarens utträdespupill (U_p) vara minst lika stor som pupillen i ett mörkeradapterat öga dvs ha en diameter på cirka 7 mm. Det vill säga, intensiteten med kikaren är G^2 gånger högre än intensiteten utan kikare.



Figur 6 Skiss över kikarkonstruktion

3.3 Ögonskador

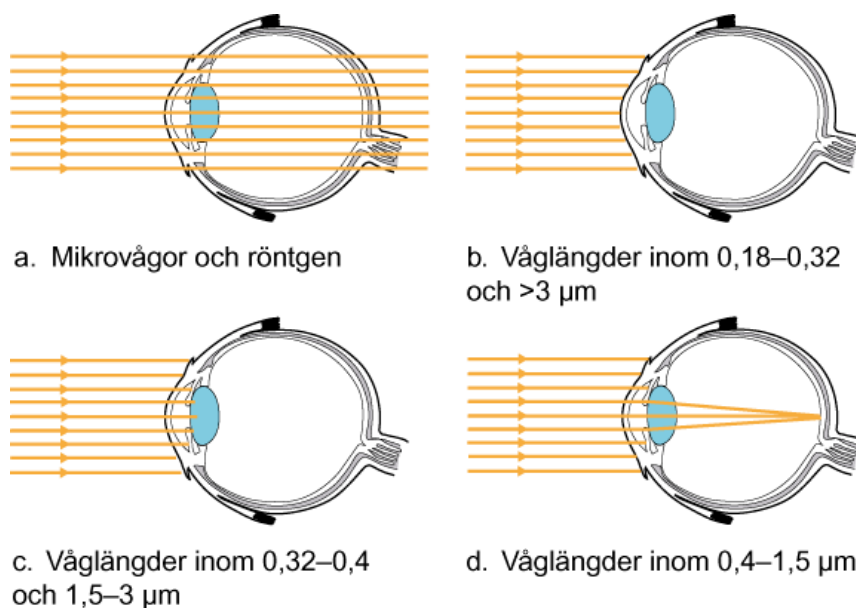
Beroende på ljusets våglängd och energi kan olika typer av skador uppstå. Det optiska våglängdsområdet ligger mellan $0,1 \mu\text{m}$ och 1 mm . Den optiska strålning som kan utbreda sig i luft och är intressant för militära tillämpningar brukar delas upp i ett antal delområden:

UV-C och UV-B	$0,2 - 0,3 \mu\text{m}$
UV-A	$0,3 - 0,4 \mu\text{m}$
Ljus	$0,4 - 0,8 \mu\text{m}$
IR-A eller När-IR	$0,8 - 1,4 \mu\text{m}$
IR-B	$1,4 - 3 \mu\text{m}$
IR-C	$3 - 14 \mu\text{m}$

Tabell 3 Indelning av det optiska våglängdsområdet

Våglängderna $0,2 - 0,3 \mu\text{m}$ samt $3 - 14 \mu\text{m}$ tränger inte in i ögat och utgör inte avsevärt större risk för ögonen än för huden. Från $0,4 \mu\text{m}$ till $1,5 \mu\text{m}$ våglängd kan strålningen tränga in och fokuseras på näthinnan, se figur 7.

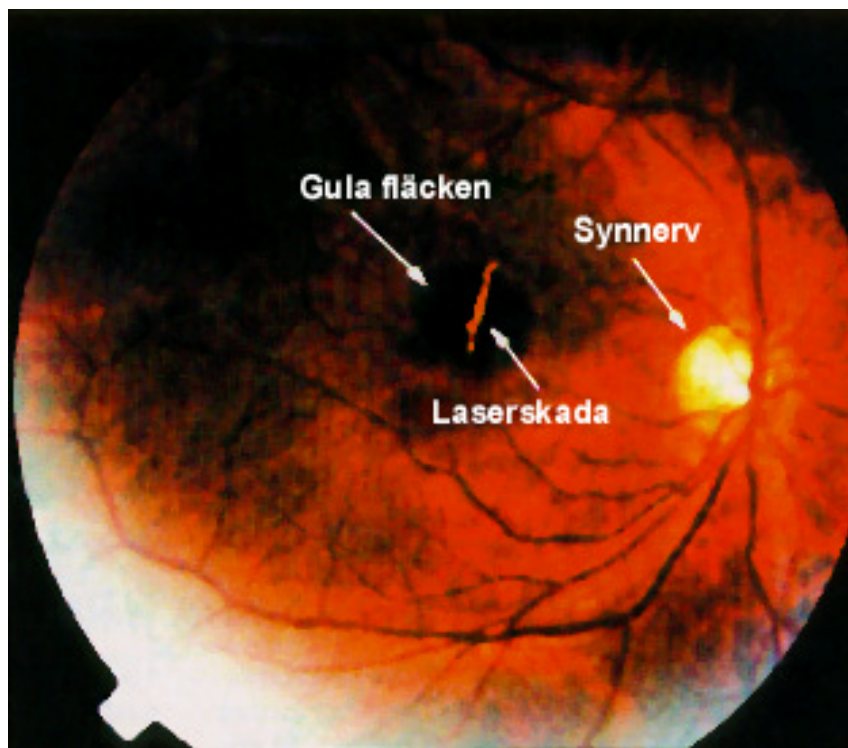
Strålning som absorberas innan den når näthinnan kan emellertid också vålla skador. Exempel på detta är brännskador på hornhinnan, grå starr, snöblindhet mm. Dessa typer av skador kräver emellertid mycket kraftiga lasrar eller lång exponeringstid. De mest aktuella lasrarna i militära sammanhang emitterar i när-IR-området. Här är det näthinneskador som utgör den stora risken.



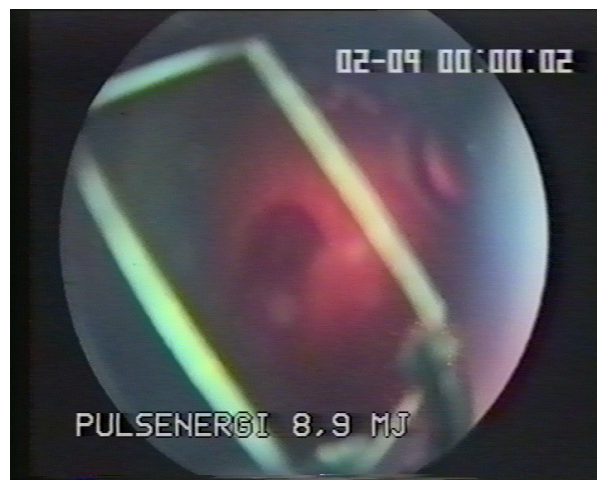
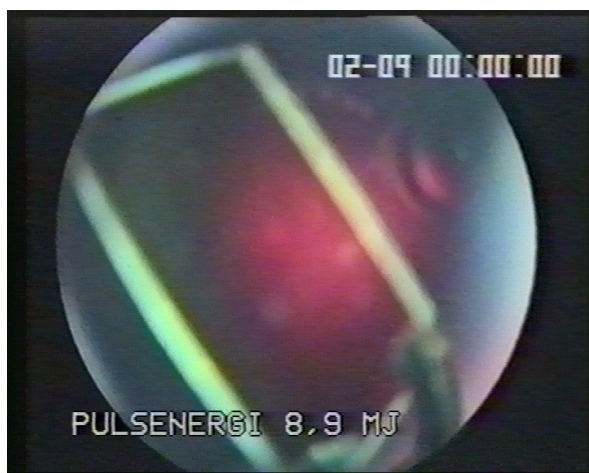
Figur 7 Schematisk bild på vad som händer med ljus av olika våglängder som infaller mot ögat.
Teckning: Martin Ek

De flesta människor har en hälsosam respekt för solen och olika sorters ljusbågar (t ex vid elsvetsning). Man undviker att se mot en sådan ljuskälla utan skydd. Rent fysiologiskt skyddas ögonen av att betraktaren upplever starkt ljus som obehagligt. Obehaget kan aktivera blinkreflexen och få betraktaren att vända bort blicken eller avskärma den starka ljuskällan med handen. För synligt ljus har ögonen alltså (förutom regnbågshinnans (iris) automatbländarfunktion) en viss inbyggd skyddsfunktion. I när-IR är denna skyddsfunktion satt ur spel eftersom vi inte kan se strålningen. Militära lasersystem som belysare och avståndsmätare har dessutom så korta pulstider att ingen fysiologisk reaktion kan hinna med att ge något skydd.

Skadeförloppet är i allmänhet termiskt. Kortvågigt ljus kan dessutom ge fotokemiska reaktioner men vi koncentrerar oss på de termiska skadorna. Det belysta området på näthinnan utsätts för en momentan temperaturhöjning som kan få äggviteämnen att koagulera i synceller och omgivande vävnad (brännskada). Ofta kan skadan (en gråvit fläck) omedelbart iakttas med hjälp av en ögonbottenkamera, figur 8. Efter någon tid utfylls skadeområdet av brunaktig ärrvävnad. Om pulsenergin ökar kan plasma eller ångblåsor momentant bildas med sönderslitande tryckchocker som följd. Dessa tryckstötter river upp ett litet område av näthinnan. Om skadan hamnat tillräckligt nära ett blodkärl så kan detta punkteras och blod komma ut i glaskroppen (ögonblödning, figur 9).⁵



Figur 8 Näthinneskada hos människa. Foto: Dr. Carmen A Puliafito, New England Eye Center.



Figur 9 Ögonblödning hos gris, orsakad av en 8 mJ rubinlaserpuls. Till vänster före och till höger efter exponering. Foto: Bengt Anderberg⁵

En faktor som ökar risken för skador i gula fläcken vid laserbelysning är ögats reflexmässiga inriktning mot förändringar i den betraktade scenen. Rörelse eller ljusblixtar inom synfältet uppmärksammas automatiskt och ögat riktas omedelbart in så att bilden av det föränderliga området hamnar på gula fläcken. Andra reflexer kan skydda synen. Obehagligt starkt ljus framkallar reflexmässiga avvärjningsreaktioner (blinkreflexer mm).

3.3.1 Konsekvenser av en skada

Skador på näthinnan kan aldrig läka eller repareras. En brännskada i gula fläcken ger ett besvärande permanent bortfall av delar av synfältet. Om skadan hamnar i centralgropen ger den ett allvarligt

handikapp. En liten perifer näthinnebrännskada kan emellertid uppstå utan att den upptäcks av individen. Hjärnan ersätter den förlorade delen av synfältet med sin omvärldsmodell och individen tror att han ser lika bra som förr. Själva skadetillfället kan gå obemärkt förbi eftersom skador på näthinnan vanligen inte vållar någon smärta.

Om pulsenergin hos lasern ökar så ökar storleken på skadan och därmed omfattningen på synstörningen. När pulsenergin blir så hög att närmaste blodkärl punkteras sker en dramatisk förändring av symptombilden. Det röda blodet bildar under blödningen en tätare och tätare slöja i glaskroppen och i svåra fall tränger inget ljus alls in till näthinnan. Blödningen upphör efter en stund och i lyckliga fall resorberas större eller mindre del av blodet så att glaskroppen klarnar och synen återvänder då efter någon eller några månader till de oskadade delarna av näthinnan. I de fall blodet ej resorberas kan glaskroppen avlägsnas kirurgiskt om den inte "koagulerat fast" i näthinnan efter blödningen.

Konsekvensen av en ögonskada kan således variera från fullständig blindhet till att patienten inte ens upptäcker att han blivit skadad.

3.4 Regler och föreskrifter

Arbetsmiljöverket (tidigare Arbetarskyddsstyrelsen) har utfärdat föreskrifter för laseranvändning i arbetslivet⁴. Regler för militär användning av lasrar finns i SäKI G⁶.

För att förenkla hanteringen av lasrar och minska beräkningsarbetet vid dimensionering av skydd har man inrättat normer och gränsvärden för ett antal laserklasser:

- Klass 1. Lasrar i denna klass kan ej ge strålskador.
- Klass 2. Innehåller endast lasrar som avger synlig strålning (ljus). I denna klass placeras lasrar där exponeringstider under 0,25 s aldrig kan skada ögon.
- Klass 3A. Innehåller laserutrustningar där strålen är så utspridd över en stor yta att den inte är mer skadlig än en "klass 2"-laser, förutsatt att strålen inte koncentreras med hjälp av optik, t ex kikare.
- Klass 3B. Direkt exponering av ögon eller hud kan ge skador. Diffust reflekterad strålning är i allmänhet ofarlig. Observera att ett föremål som ser matt ut i synligt ljus kan vara spegelblankt i IR.
- Klass 4. Även diffust reflekterad strålning är skadlig.

Klass 2 omfattar endast synliga lasrar som aktiverar blink- och avvärjningsreflexer mot starkt ljus inom 0,25 s, så att ögat förblir oskadat. Observera att om reflexerna undertrycks kan ögonen skadas. (Jämför ögonrisken med att stirra mot solen.) Säkerhetskraven vid arbete med lasrar av klass 3B och 4 är mycket omfattande jämfört med lasrar i lägre klasser.

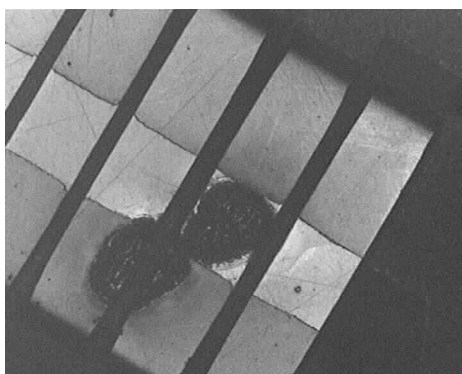
3.5 "Ögonsäker" laser

Begreppet "ögonsäker laser" används ofta (något oegentligt) för att ange att en laser emitterar inom ett ganska smalt våglängdsintervall vid de kortaste IR-B våglängderna ($\approx 1,54 \mu\text{m}$). Anledningen till detta är ögats speciella egenskaper nära denna våglängd. Strålningen når inte näthinnan och vållar därmed inga skador på syncellerna. Absorptionen av strålningen sker heller inte ytligt i hornhinnan utan gradvis i hornhinna, kammarvatten och glaskropp. Strålningen absorberas således av en stor vävnadsvolym. Ögat blir därmed mindre skadekänsligt vid denna våglängd än huden runt omkring ögat. För att undvika missförstånd bör man också ha klart för sig att en tillräckligt hög exponering vid $1,54 \mu\text{m}$ våglängd kan skada ögat, trots benämningen "ögonsäker". Bildförstärkare och andra elektrooptiska sensorer kan dock skadas eftersom de inte har samma absorptionsspektrum som ögat. Exempel på ögonsäkra lasrar är den s.k. ramanskiftade Nd:YAG lasern och erbiumlasern som båda strålar kring $1,5 \mu\text{m}$.

3.6 Skador på teknisk utrustning

Laserverkan mot elektro-optiska (EO) sensorer kan delas upp i två olika fall. I det ena fallet används lasersystemet för att störa sensorn så att viktig information går förlorad och sensorn temporärt blir obrukbar. Det andra fallet av laserverkan är då lasern används för förstörande verkan. Den minst krävande formen av skadeverkan, från lasereffektsynpunkt, är generering av skada på känsliga komponenter i sensorn, t ex detektorn. Andra typer av verkan är skador på sensorns frontoptik eller strukturskada på sensorplattformen. Med strukturskada avses först och främst skada på huvar hos helikoptrar och flygplan samt skal på robotar. Strukturförstörande verkan kräver betydligt högre effekttäthet jämfört med verkan mot detektorer.

Liksom ögon, blir även andra typer av optiska sensorer som innehåller linser som koncentrerar infallande ljus på en liten yta extra känsliga för skada. Figur 10 visar en halvledardetektor, placerad i ett fokalplan, som skadats av laser⁷.



Figur 10 Skada på indiumantimoniddetektor, orsakad av laser.

Ett viktigt begrepp vid definition av laserskador är skadetröskeln, vilken definieras som den energi- eller effekttäthet som krävs för att inducera en irreversibel skada hos detektorn. Ett problem är här att definiera vad som menas med irreversibel skada. Vanligtvis definieras skadetröskeln som laserenergin för vilken en synbar skada uppstår på detektorn, retikelytan. Skadan orsakar vanligtvis att detektorn slutar fungera. En annan typ av skada kan kopplas till den elektriska funktionen hos detektorn. Om laserpulsen orsakar förändringar i detektorns halvledarmaterial kan de elektriska egenskaperna hos detektorn förändras, vilket påverkar detektorns funktion. T.ex. kan känsligheten försämrats till följd av laserexponeringen.

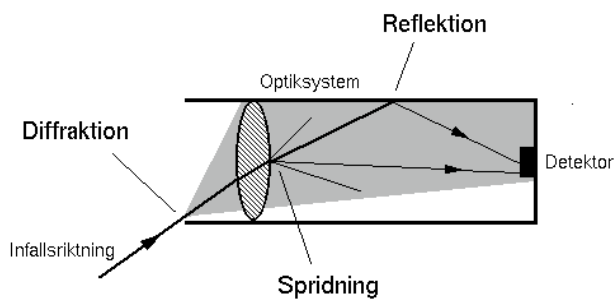
3.7 Bländning

Laserstrålning av intensitet under skadetröskeln kan orsaka bländning, både i ögon och andra optiska sensorer. Figur 11 visar en bild från en bländad videokamera, av samma typ som används som övervakningskamera. Om t ex en bankrånare utför bländningen blir han svår att identifiera.



Figur 11 Bild från videokamera bländad av en 1 mW dubblad Nd:YAG laser.

Bländningen kan förvärras av ströljus. Ströljus är oönskad strålning som uppkommer genom spridning, reflektion och diffraktion i ett optiskt system, se figur 12.



Figur 12 Ströljus

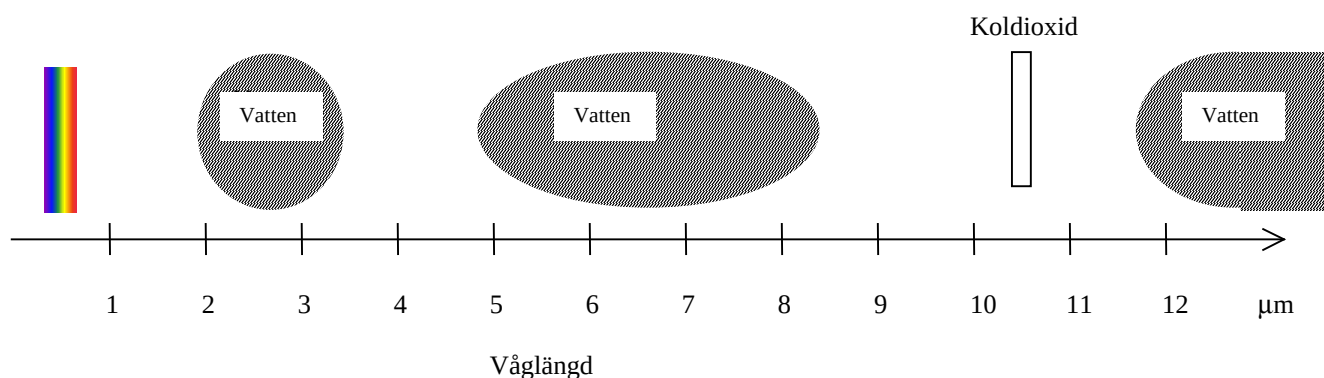
Spridning orsakas av ojämnheter och ofullkomligheter i ytor och linsmaterial. Diffraktion uppstår vid passage av kanter och aperturer. Reflexer erhålls i t ex linsfattningar och optikhusets innerväggar. Ströljuset gör att även en laser utanför synfältet kan blända detektorn.

4 Hotet - Militära lasersystem idag och i framtiden

Tidigt efter uppfinnandet av lasern insågs det militära värdet av en högintensiv ljuskälla man kunde ha god kontroll över.

4.1 Våglängdsområden

Alla våglängder är inte användbara i militära tillämpningar pga att ljuset absorberas i atmosfären. Militära spaningssystem finns idag i det synliga (400-700 nm) i det nära infraröda (700-2000 nm), i området 3-5 μm och i området 8-12 μm , figur 13.



Figur 13 Det elektromagnetiska spektrat med vattens absorptionsband markerade.

Den vanligaste militära lasern är den s.k. Nd:YAG-lasern som används för avståndsmätning och målutpekning för laserstyrda robotar och projektiler. Den har tillverkats i många tiotusentals exemplar och är av fasttillståndstyp. Lasermediet utgöres av en ofta stavformad kristall (typiskt 7X75 mm) som traditionellt har pumpats med ljuset från en blixtlampa. Laservåglängden är 1,064 μm , som ligger strax utanför det synliga våglängdsområdet (0,4-0,7 μm).

4.2 Stödfunktionslasrar

Lasern används operativt främst för avståndsmätare, figur 14 och vapenstyrning, figur 15 och målbelysning, figur 16. Inte i något av dessa fall är avsikten med lasern att skada ögon eller sensorer, men lasrarnas intensitet är så hög att skador kan uppstå genom olyckshändelse om en oskyddad sensor kommer in i strålgången.

Nära 100 000 utrustningar baserade på Nd:YAG-lasern (1,064 μm) har tillverkats. Strålning kan tränga in i ögat och med hög effekttäthet fokuseras på näthinnan. Laserstrålning är därför ögonfarlig speciellt om strålen betraktas genom en förstörande optik. Utvecklingen på avståndsmätarsidan har därför under de senaste åren koncentrerats på att få fram ögonsäkra lasrar vilket kräver att våglängden ligger nära 1,5 μm . Användning av dämpfilter framför lasern och reflektorer i målet inte ger en helt realistisk övningssituation. Den svenska stridsvagn 122 har t ex en avståndsmätare baserad på en ögonsäker erbiumlaser.⁶



Figur 14 Stridsfordon 90 är försett med en Nd:YAG avståndsmätarlaser. Foto: Hägglunds Vehicle

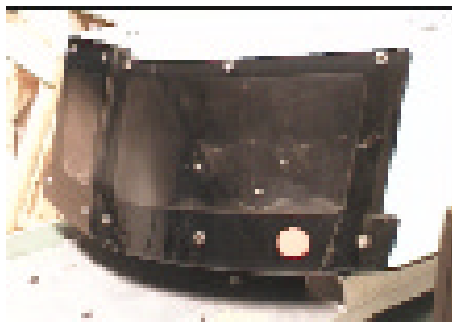
En laserstyrningsprincip är *ledstrålestyrning*, som används i Robot 70 och 90-systemen. ADATS-systemet, som införts i bl.a. Kanada, är ett annat exempel på ledstrålesystem. Skytten lägger siktets hårkors över målet varefter ledtrålen tänds och roboten skjuts iväg. I robotens akter finns detektorn som känner av laserstrålen. Strålen rör sig i ett bestämt mönster så att en viss tidpunkt svarar mot ett bestämt läge hos strålen. Robotelektroniken innehåller en klocka och kan därför bestämma robotläget i det ögonblick detektorn träffas av strålen. När läget är betstämt ges styrsignaler till rodren så att roboten söker sig in mot centrumlinjen svarande mot hårkorsets syftlinje.³



Figur 15 I robot 90-systemet styrs roboten av en laserledstråle, diodlaser, nära IR. Photo: Lv 7, Boden

Laser används även i *zonrör* för att öka träffytan. Kompakta laserdioder sänder ut korta pulser (10-30 ns, $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$) med relativt hög pulsfrekvens. Ofta används korsande sändar- och mottagarlober för att tillsammans med en kort öppentid i mottagaren, skapa en väl definierad känslighets-volym varifrån pulsekon initierar tändröret. Problem uppstår bl.a. i moln med falska reflexer. Till stora delar kan dock dessa diskrimineras med signalbehandling av lasersvaret. I Sverige tillverkas laserzonrör för jakt- och luftvärns-robot.

IR lasrar kan användas tillsammans med bildförstärkare eller IR-kameror för att belysa en omgivning utan att fienden, om de inte har mörkerutrustning, märker att han är belyst.



Figur 16 Rysk belysningsutrustning med 6 stycken diodlasrar.

4.3 Högenergilasrar

En laser med mycket hög effekt kan förstöra strukturer i material, t ex smälta metall. Koldioxidlaser används inom industrin för att skära stålplåt upp till 50 mm tjocklek. Att göra motsvarande på stora avstånd ställer höga krav på strålkvalitet och låg turbulens i atmosfären. Högenergilasrar är mycket ovanliga och behandlas därför inte här.³



Figur 17 Laserverkan som funktion av effekt. Teckning: Martin Ek

4.4 Antisensorlasrar

Till skillnad från stödfunktionslasrar är antisensorlasrar avsedda att skada optiska sensorer och därmed hindra motståndaren att erhålla visuell information.

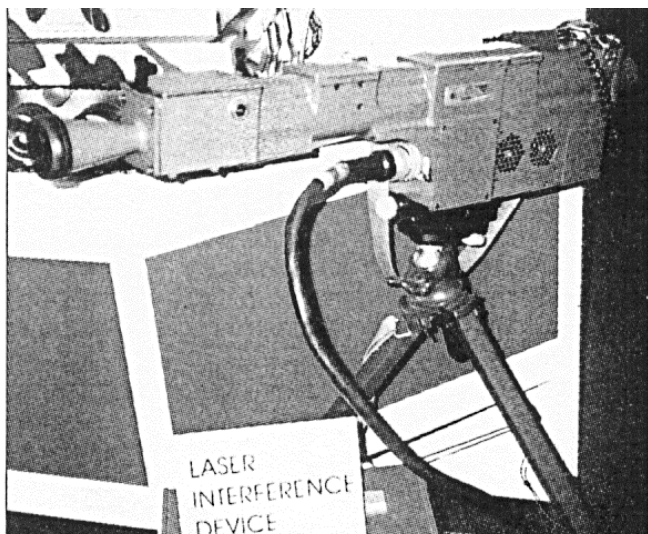
Störning och förstöring av sensorer och målsökare kräver inte lika hög lasereffekt som strukturförstörande laservapen. Det finns idag ett antal lasersystem framtagna speciellt för detta ändamål,

exempel på ett mindre respektive större system visas i figurerna 18 och 19. Dessa baseras främst på laserdiodpumpad fasttillståndslaser vilket är en teknik som lämpar sig för militära miljöer. Det kan vara en laserdiodpumpad Nd:YAG laser som våglängdskonverteras för verkan inom hela 0,4-5 μm -bandet. Med frekvensdubbling och våglängdskonvertering når man kortare våglängder vilka kan användas mot sensorer i den synliga delen av spektrat. Om denna stråle i sin tur används för att pumpa en OPO eller ett färgämne i fast tillstånd får man avstämbarhet i våglängd. Med en OPO kan avstämbara längre våglängder erhållas.

Utvecklingen går idag mot effektivare och mindre system för störning av främst målsökare känsliga i bandet 2-5 μm . Den kritiska komponenten är i detta fall det icke linjära materialet i våglängdskonverteraren. Kristaller för det synliga bandet och upp till 5 μm finns kommersiellt tillgängliga men effektiviteten är för det mesta 10%-30% och materialets skadetröskel medger inte mer än 50 mJ pulsenergi för de mest skadetåliga materialen. I de flesta fall är detta fullt tillräckligt för att störa sensorer. Förstöring av detektorer kräver högre energier. I det synliga bandet och vid 1 μm finns idag laser med tillräcklig pulsenergi. I 2-5 μm -bandet är det dock inte realistiskt att nå förstörande ut effekter med laser som våglängdskonverterats med icke linjära kristaller. För sensorer och målsökare känsliga i våglängdsbandet 8-12 μm används idag koldioxidlaser vilken ger avstämbar laservåglängd i de centrala delarna av fönstret.



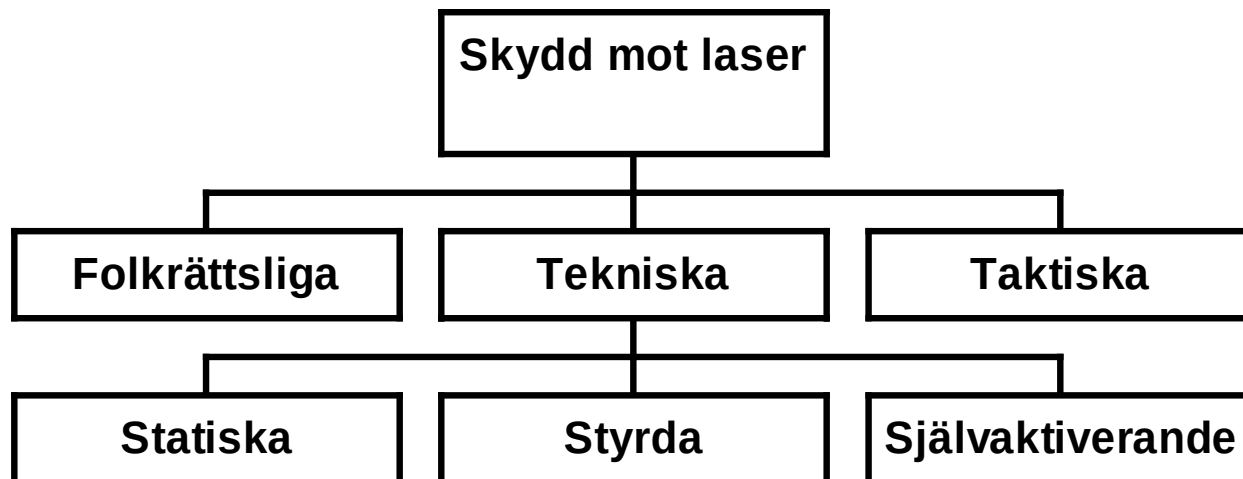
Figur 18 Handhållen laserficklampa som ger 1 W kontinuerlig effekt vid 850 nm.



Figur 19 Kinesisk antisensorlaser som visats offentligt vid vapenmässa i Manilla 1995.

5 Skydd mot laser

Denna rapport behandlar i första hand tekniska skydd mot laser, men det är viktigt att komma ihåg även de icke-tekniska skyddsprinciper som finns och välja rätt skyddsprincip, figur 20 och 21.



Figur 20 Indelning av skydd mot laser i kategorier

För att skydda mot störning kan flera av de skyddsprinciper som används för skadeskydd utnyttjas. Det är rimligt att vidtagna åtgärder ger skydd mot både störning och skada, varför skadeskyddet oftast är dimensionerande.



Figur 21 Kriterier vid val av laserskydd

5.1 Folkrättsliga skydd

Det har genom decennierna träffats ett antal internationella överenskommelser om vad som ska anses strida mot folkrätten beträffande vapen och stridsmetoder. Röda Korset har på följande sätt formulerat de traditionella principerna för krigförandes användning av vapen: "Vapen ska inte orsaka onödigt lidande, ha urskillningslösa verkningar eller verkningar bortom vapenbrukarens kontroll." Detta brukar i FN-sammanhang reduceras till två faktorer som anses medföra att vapen och stridsmetoder strider mot folkrätten:

1. Ytterst skadebringande verkningar.
2. Urskillningslösa verkningar.

Förbudet mot stridsgaser har exempelvis i första hand tillkommit för att de har "urskillningslösa verkningar" eftersom de påverkar alla levande varelser, militära som civila. Det mest verkningsfulla argumentet mot ögonskadande laser är dess "ytterst skadebringande" effekt. Ögonfarliga lasrar kan med mycket enkla och billiga metoder orsaka stor skada och livslånga handikapp hos den som drabbas. Enbart ovanstående två faktorer räcker dock inte för att vapen eller stridsmetoder ska förbjudas. En internationell enighet måste också nås för att åstadkomma en verkningsfull konvention.

Genom FN:s försorg tillkom 1980 "UN Inhumane Weapons Convention - UNWC". Konventionen utvidgades 1995 med ett protokoll mot ögonskadande laservapen. Sverige var ett av de drivande länderna vid förhandlingarna om detta. Försöken att få konventionen att täcka även interna konflikter misslyckades, varför protokollet endast gäller vid mellanstatliga konflikter. Protokollet är benämnt "Protokoll om förbud mot användning av synförstörande laservapen (Protokoll IV)" och har följande lydelse:

Tilläggsprotokoll IV till konventionen om förbud mot eller inskränkningar i användningen av vissa konventionella vapen som kan anses vara ytterst skadebringande eller ha urskillningslösa verkningar:

§1: Det är förbjudet att använda laservapen som är särskilt konstruerade för att som enda stridsmedelsfunktion, eller som en av sina stridsmedelsfunktioner, bestående förstöra en normal synförmåga, d v s ett oskyddat öga eller ett öga med korrektionslinser. De höga fördragsslutande parterna får inte överlåta sådana vapen till någon stat eller ickestatligt subjekt.

§2: Vid användning av lasersystem ska de fördragsslutande parterna vidta alla möjliga försiktighetsåtgärder för att undvika bestående förstörelse av normal synförmåga. Sådana försiktighetsåtgärder skall innefatta utbildning av deras väpnade styrkor och andra praktiska åtgärder.

§3: Synförstörelse som en biverkan eller indirekt verkan av legitim militär användning av lasersystem, däribland sådana som används mot optisk utrustning, omfattas inte av detta protokoll.

§4: I detta protokoll avses med "bestående synförstörelse" oåterkallelig och icke korrigerbar synförlust som är allvarligt invalidiserande och saknar utsikt till läkning. Allvarlig invaliditet motsvarar en synskärpa på mindre än 20/200 Snellen mått på båda ögonen. 20/200 är den synskärpa som krävs för att urskilja detaljer som upptar 10 bågminuter (= 2,9 mradianer). "Normalsyn" motsvaras av 20/20 Snellen, vilket krävs för att urskilja detaljer som upptar en bågminuts synvinkel. På 30cm avstånd kan personer med synskärpan 20/200 Snellen inte urskilja de bokstäver som denna text är skriven med.

5.1.1 Kommentarer till konventionen

Ordalydelsen i artiklarna är den officiella översättning från den engelska originaltexten. I artiklarna §1 och §2 har begreppet "unenhanced vision" översatts till "normal synförmåga", vilket är en tvetydig formulering eftersom den kan förväxlas med synskärpa eller kvaliteten hos en individs synsinne. Vad som avses är egentligen "obeväpnat seende", dvs ett betraktande utan hjälp av förstorande optik (t ex kikare eller optiskt sikte). Glasögon eller kontaktlinser räknas här inte som förstorande optik. Vidare är "bestående förstöra en normal synförmåga" en översättning av "cause permanent blindness to unenhanced vision", varvid den svenska översättningen kan förefalla något vagare formulerad än originaltexten.

Den första artikeln innebär ett förbud mot bruk av laservapen i syfte att skada ögonen på människor som inte använder optiska hjälpmedel (bortsett från glasögon och kontaktlinser). Den andra artikeln slår fast att laserstrålning ska användas med försiktighet så att ögonskador om möjligt undviks. Protokollets 1:a och 2:a artikel kan ge intryck av att ge ett långtgående skydd mot användning av synförstörande laser. Artikel 3 synliggör emellertid de omfattande friheter för användning av ögonfarlig laser som kvarstår.

Observera att en antisensorlaser konstruerad för att skada elektrooptiska sensorer inte omfattas av konventionen.

Det är egentligen endast obebäpnade ögon som skyddas av konventionen. Utnyttjande av kikare, sikten, kameror m. m. legitimerar troligen användningen av synförstörande laser mot ögon som betjänar dessa instrument. Synskador på obebäpnade ögon som bieffekt av laserexponering i syfte att mäta avstånd, störa/förstöra optiska sensorer, målutpekning etc. omfattas inte heller av konventionen.

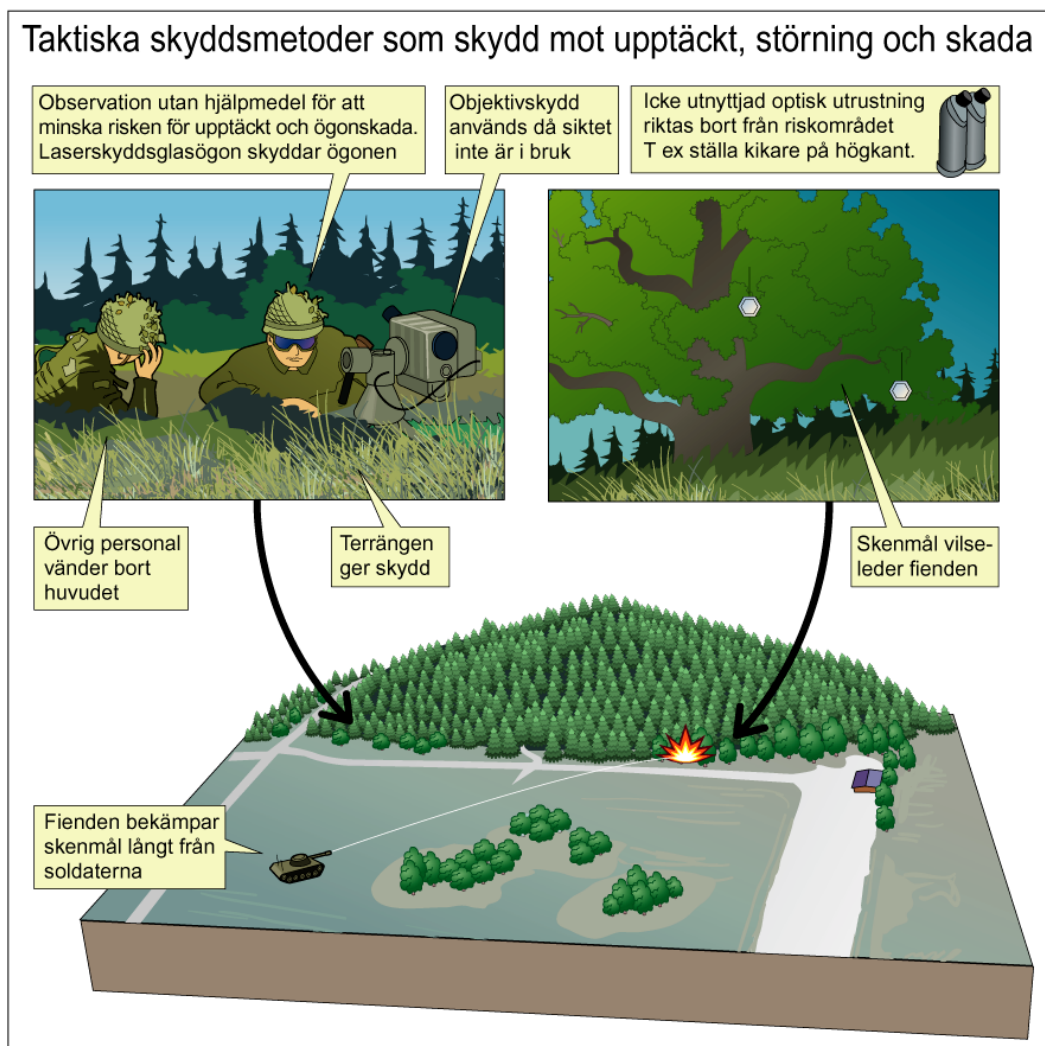
Oklarheter i tolkningen av protokollet kan vara betydande, inte minst artikel 4 eftersom det inte har funnits någon internationellt erkänd definition av "blindhet" eller "bestående synförstörelse". Den angivna definitionen ger upphov till ett besvärligt mätproblem, eftersom det i någon del av synfältet kan återstå tillräcklig synförmåga samtidigt som den skadade saknar förmåga eller motivation att använda den. En annan svårighet är att bestämma om den skadade sett bättre före skadan eller ej. Trots oklarheter och luckor i konventionen har den dock fått inflytande över vapenutvecklingen. All öppet redovisad utveckling av ögonskadande antisensorlasrar har avbrutits i västvärlden.

Generellt gäller att det folkrättsliga skyddet för deltagarna i t ex internationella fredsbevarande operationer är oklart. Dessa operationer betraktas ibland som internationella konflikter, bl a på grund av att de riskerar att eskalera till sådana, medan de andra gånger närmast betraktas som polisiära insatser. Avtalen ger ändå en "folkrättslig inriktning", och pekar på vilka åsikter man inom det internationella samfundet någorlunda kunnat ena sig om när det gäller synen på vilka vapen som strider mot allmänna folkrättsliga regler.

Avtalens intentioner följs i flertalet konflikter. Om detta beror på avtalen, på någon inneboende "rättskänsla" hos de stridande parterna och deras ledare eller på rädsla för andra parter agerande mot den som bryter mot internationellt ingångna avtal är osäkert. Oavsett skäl bidrar de nedtecknade avtalen till att uttrycka en allmänt vedertagen syn på "rätt" och "fel".³

5.2 Taktiska skydd

En laser avsedd att skada har en kollimerad stråle, dvs en smal lob, för att koncentrera energin i en så liten yta som möjligt. Detta kräver att invisning av den fientliga lasern kan göras med stor noggrannhet, vilket i sin tur kräver att fienden vet var vi finns. Det viktigaste taktiska skyddet mot laser blir därför att skydda oss mot upptäckt, figur 22.



Figur 22 Exempel på användning av skenmål som taktiskt skydd mot laser. Teckning: Martin Ek

Många av de tekniska åtgärderna för skydd mot skada och störning är också verksamma för att minska risken att bli upptäckt av en optikspanare. En sådan sveper en laserstråle över ett område och detekterar reflexer från optisk utrustning. I de fall där laservåglängden för motståndarens optikspanare är känd kan ett fast spektralt filter i det närmaste helt eliminera upptäcktsrisken. Även gråfilter, liksom att undvika reflekterande ytor nära sensorns fokalplan, kan kraftigt sänka lasermålarean. Om optiken är försedd med ett plant frontfönster bör detta vinklas ner mot marken för att ej ge reflexer i riktning mot hotet.

5.3 Tekniska skydd

5.3.1 Statiska skydd

Med statiska skydd avses skydd som är oföränderliga under den tid ett laserangrepp pågår. De militära skydd som använts mot laser fram till slutet av 1990-talet har nästan uteslutande varit av den statiska typen. Eftersom laserhotet fram till dess i huvudsak bestod av lasersystem med ett fåtal möjliga våglängder, gav de statiska skydden ett tillfredställande skydd. Mera avancerade hot, med korta högintensiva laserpulser med okänd och kanske varierande våglängd, medför dock att de statiska skydden inte ensamma kan ge ett fullgott laserskydd. Statiska skydd kommer emellertid även i framtiden att vara nödvändiga som komplement och för att minska kraven på de styrda och självaktiverande skydden.

Svenska försvarsmakten var mycket tidigt ute med multispektrala statiska laserskydd. Redan 1966 köptes 850 000 svarta ögonlappar. Med denna typ av skydd riskerar man att få en skada på ena ögat, men det andra ögat är väl skyddat.



Figur 23 Försvarsmaktens laserskydd från 1966. Nd:YAG laser med dubblare, tripplare och OPO i FOI:s laboratorium i bakgrunden.

Spektrala filter, som selektivt dämpar vissa våglängder, används rutinmässigt vid laboratoriearbete med laser. Skyddsglasögon väljs, som dämpar den använda laserns våglängd. Om laserns våglängd är okänd kan fasta filter inte ge ett säkert skydd.



Figur 24 Exempel på några olika skyddsglasögon

Laserskyddsfiler, i t ex skyddsglasögon, är försedda med en standardiserad märkning. Förkortningen OD står för optisk densitet och definieras som

$$OD = -\log(\text{transmission}).$$

Ett annat vanligt mått på dämpning är decibel (dB), vilket definieras som:

$$\text{Dämpning(dB)} = -10 \log(\text{transmission})$$

Där transmissionen är transmitterad irradians dividerad med infallande irradians.

T. ex. Ett filter som tar bort 99% av infallande ljus, dvs har transmissionen 0.01, har ett OD-värde på

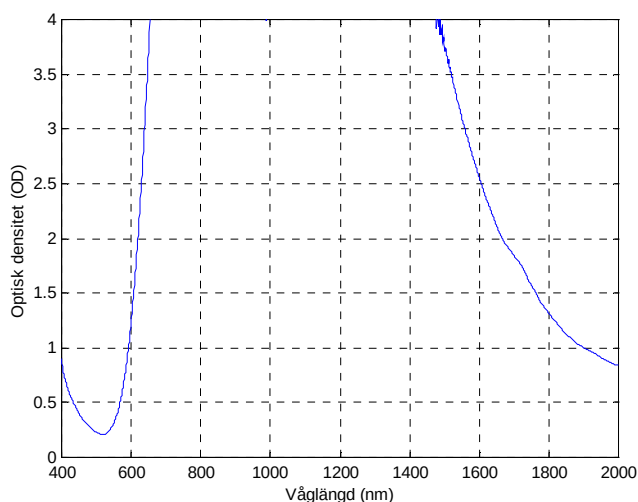
$$-\log(0.01)=2$$

och en dämpning på $-10 \log(0.01) = 20$ dB.

OD värdet eller dämpningen anges alltid tillsammans med det våglängdsområde det gäller för. OD-värdet anges antingen i klartext eller i en bokstavskod, t ex L6A betyder OD=6, se figur 25 och 26. Om två eller flera filter placeras efter varandra kan OD-värdena för de enskilda filtren adderas för respektive våglängd.



Figur 25 Exempel på märkning av skyddsglasögon. Dessa har god dämpning i området 700-1500 nm.



Figur 26 Uppmätt transmission för glasögonen i figuren ovan.

Spektrala filter i det synliga området försämrar färgbalansen. I figur 28 visas en vy över FOI:s innergård sedd genom tre olika typer av laserskyddsglasögon.



Figur 27 Färgbalansen försämras av spektrala filter.

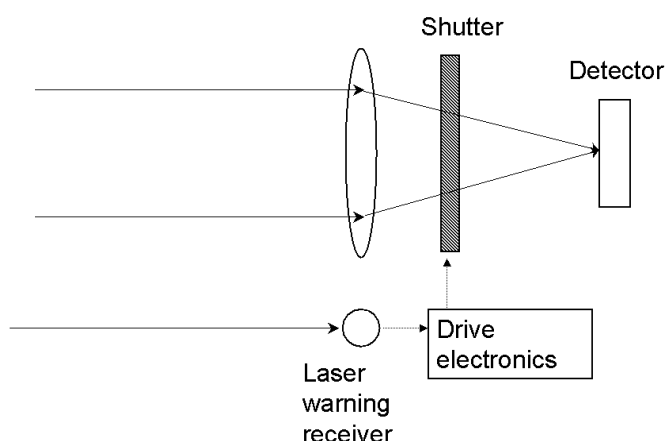
Den enda nu tillgängliga metoden för att helt säkert skydda ögat från skadlig laserstrålning är att aldrig titta direkt mot en hotande laser. Detta kan lösas med hjälp av en TV-kamera kopplad till en monitor. Ett system för indirekt seende i ett fordon kallas också "elektrooptisk utblick". Indirekt seende har, förutom laserskyddsaspekten, andra militära fördelar. Ett stridsfordon kan konstrueras helt utan fönster och på så vis göras mer svårupptäckt på radar samt förses med ett bättre ballistiskt skydd. Fordonsföraren kan också placeras på godtycklig plats i, eller utanför, fordonet, t ex längst bak, där skyddet är bättre. Mörkersiktshjälpmedel (Night Vision Goggles, NVG) visserligen som ett utmärkt ögonskydd då bäraren inte observerar omgivningen direkt utan genom utrustningen, men man ska dock komma ihåg att utrustning för indirekt seende kan förstöras eller bländas ut av laser så att användaren, trots att ögonen är oskadade, inte ser någon och därmed inte kan fullgöra sin uppgift, figur 28. Andra nackdelar med NVG är att upplösningen blir sämre och synfältet mindre än vid direkt seende. Dessutom ser man inte färger med de NVG:er som finns idag.



Figur 28 Indirekt seende. Med "Night Vision Goggles" skyddas ögonen från skada.

5.3.2 Styrda skydd

Om hotlaserns egenskaper är okända krävs skydd vars egenskaper kan ändras, t ex av en yttre styrsignal. Det finns olika typer av styrda skydd, t ex slutare, dämpare och avstämbara filter. De enklaste typerna utgörs av slutare eller optiska filter som kopplas in mekaniskt. Utvecklingen går dock mot elektroniskt styrda elektrooptiska komponenter, eftersom dessa kan göras mycket snabbare än de mekaniska.



Figur 29 Principen för styrda skydd mot laser

Laservarnaren (LWR) känner av en laser inom en viss sektor och ger styrsignal till skyddet, figur 29. Varnaren kan också ge information om laserns energi, pulslängd, pulsrepetitionsfrekvens och, i vissa fall, våglängd. Exempel på en operativ laservarnare visas i figur 30.

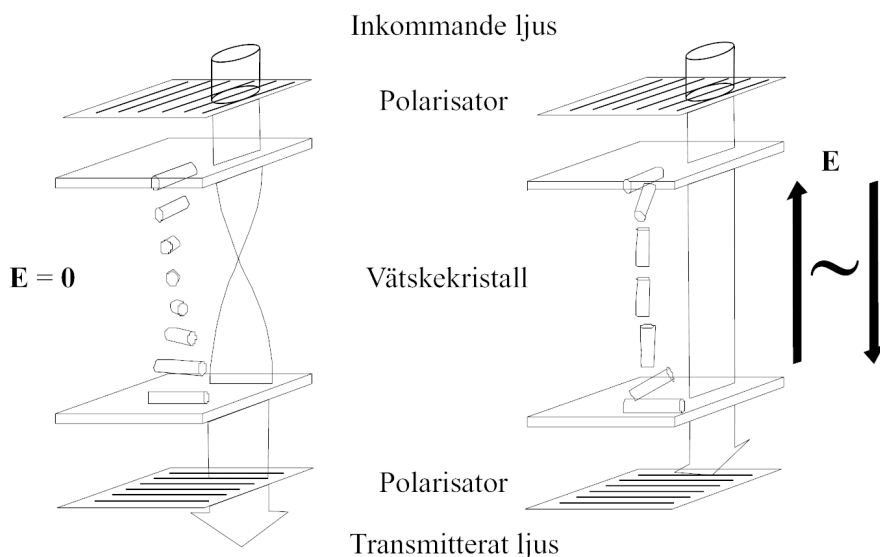


Figur 30 Laservarnare av typ LWS-2 från israeliska Amcoram.

För slutar- och filtertillämpningar studeras nya typer av elektrooptiska material, vilka förändrar sina optiska egenskaper under inverkan av elektriska fält. Komponenter som tillverkats av sådana material kan styras med elektriska signaler och innehåller inga rörliga delar. Om flera små sådana komponenter monteras sida vid sida erhålls en SLM (Spatial Light Modulator), vilken kan placeras i ett fokalplan för att selektivt dämpa strålning från de delar av scenen som är belysta av antisensorlaser (selektiv bildfältsdämpning). Skade- och störningsrisken minskar, men upplösning och känslighet kan försämrats. En nackdel med SLM:er placerade i fokalplan är också att de kan öka optikens lasermålarea, vilket ökar risken för upptäckt.

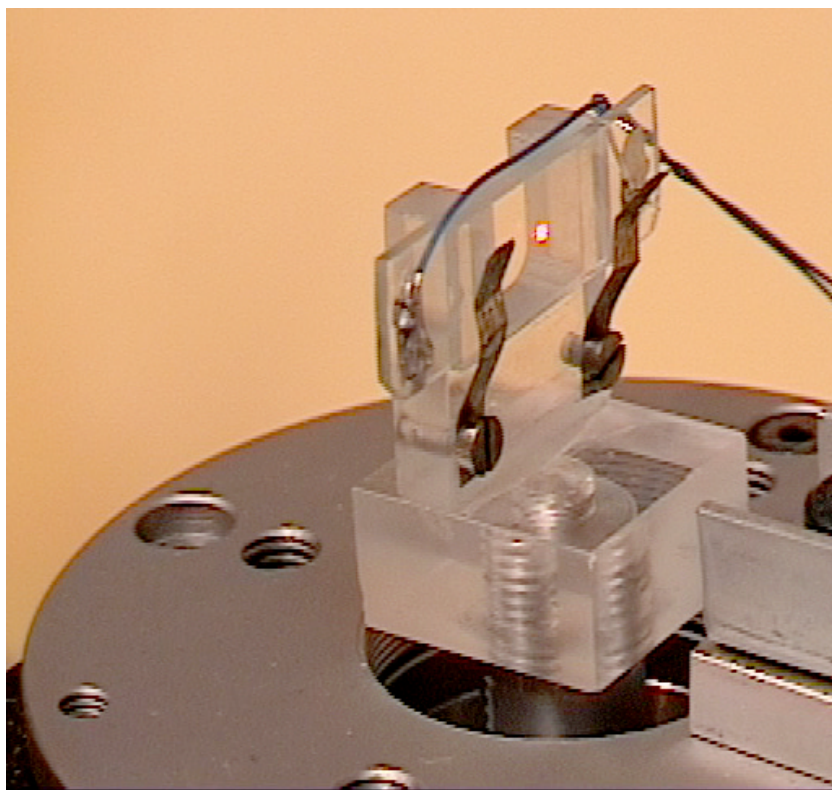
Ett annat sätt att bibehålla viss optisk information när skyddet är aktivt är att använda avstämbara filter. Dessa dämpar i ett visst våglängdsområde, som kan ändras genom en yttre styrsignal, t ex från en laservarnare som känner av laserns våglängd.

Många aktiva skydd baseras på vätskekristallteknik. Man utnyttjar vätskekristaller, vars långsmala, polära och optiskt anisotropa molekyler har god ordning i en dimension men uppträder som vätska i de övriga två dimensionerna. Genom ett elektriskt fält kan molekylerna vridas. Polarisationsstillståndet hos ljus som passerar genom materialet kan därmed komma att ändras eftersom materialet är optiskt anisotropt. Figur 32 visar hur ljusets polarisation vrids av vätskekristallmolekylerna, se figur 31.

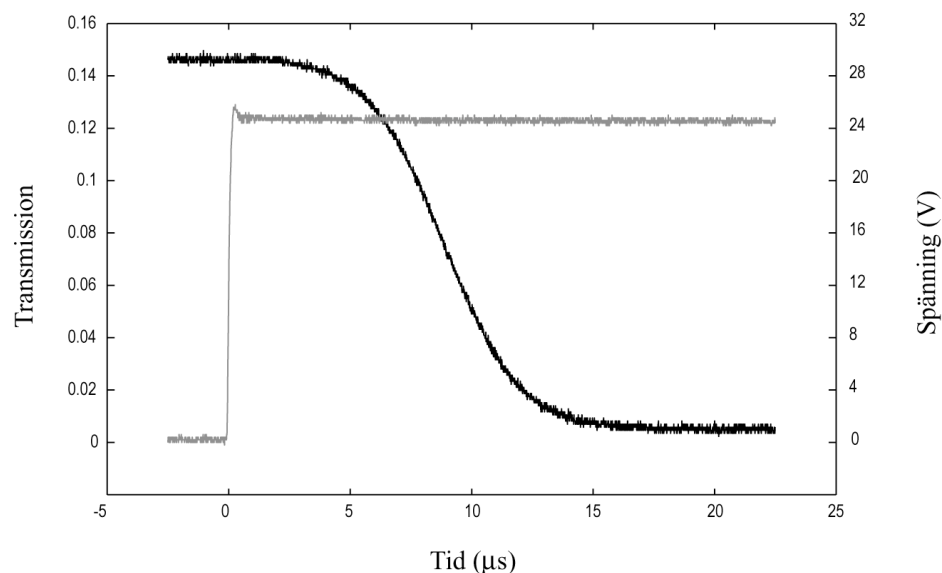


Figur 31 Ett vätskekristallint material vrider ljusets polarisation.

Praktiskt placeras det vätskekristallina materialet mellan två glasplattor, som gjorts ledande genom beläggning med t ex Indium-Tenn-Oxid (ITO). Komponenten placeras mellan två polarisatorer för att åstadkomma utsläckning av ljuset då spänning läggs på. Det kan se ut som i figur 32.⁸ Omslagstiderna för dessa komponenter ligger i storleksordningen 10 μ s, figur 33.

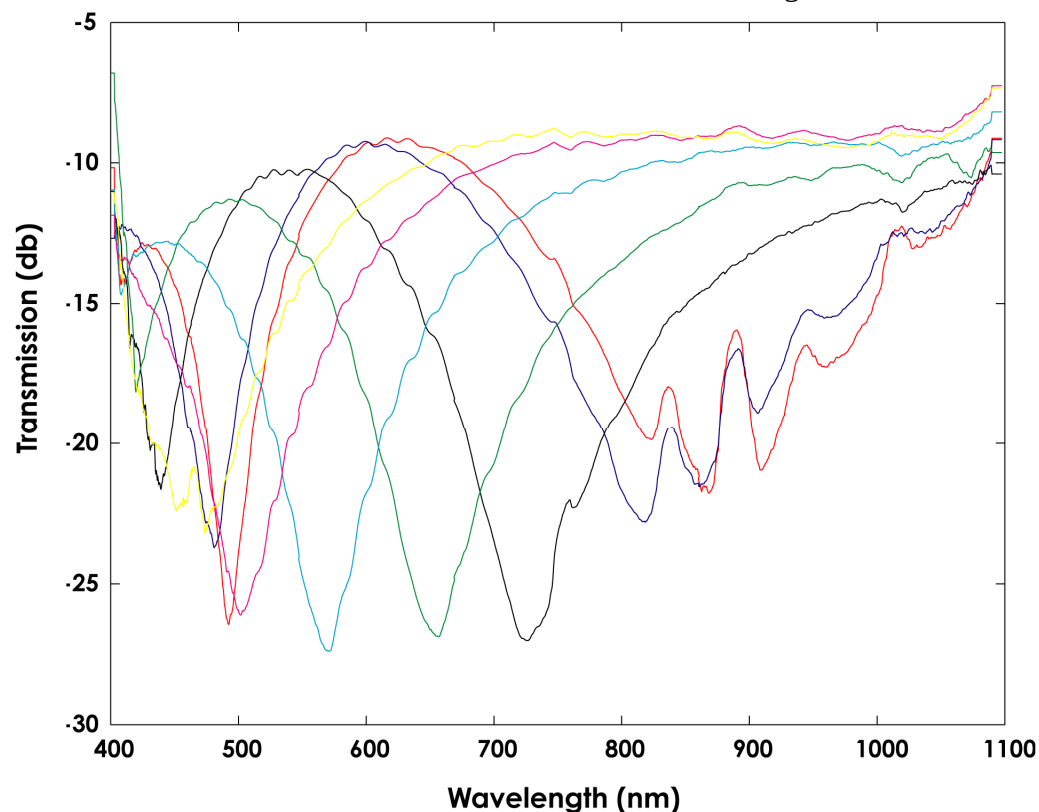


Figur 32 Vätskekristallkomponent



Figur 33 Uppmätt omslagstid för en vätskekristallkomponent, i detta fall ca 10 μs .

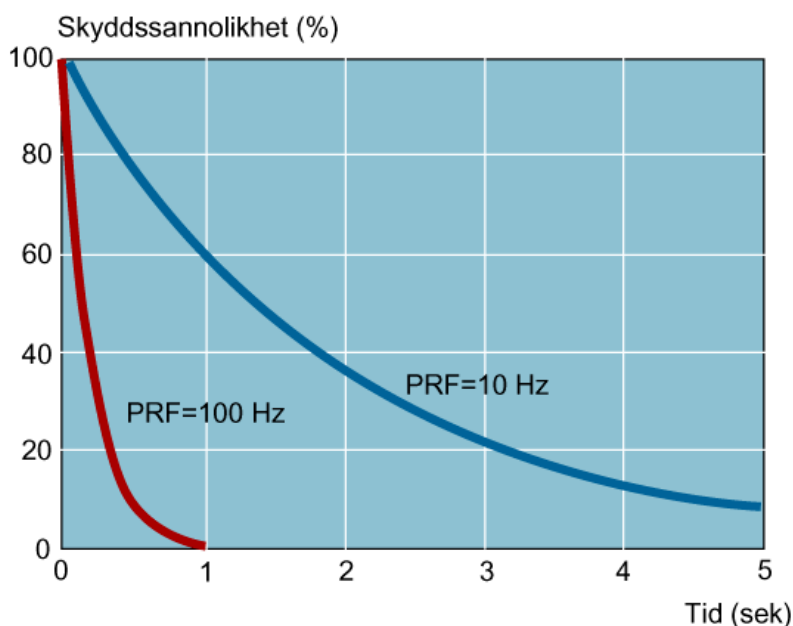
Med liknande teknik kan även avstämbara filter tillverkas, figur 34.



Figur 34 Transmission för elektriskt avstämbar filter baserat på vätskekristallteknik. De olika kurvorna är uppmätta med olika spänning lagd över komponenten.

Slutare och filter kan användas för att framställa stokastiska skydd. Om en slutare t. ex. är öppen 5 % av tiden är sannolikheten 95 % för att den första laserpulsen träffar en stängd slutare istället för att orsaka skada, förutsatt att laserpulserna anländer helt okorrelerat med slutarens öppningsrytm. Efter t. ex. 100 stycken slumpvis ankommande laserpulser är sannolikheten att ingen puls penetrerat skyddet $0,95^{100} \approx 0,006 = 0,6 \%$, vilket motsvarar en oacceptabelt låg skyddsnivå. Stokastiska skydd måste därför vanligen kompletteras med exempelvis varnaraktiverade skydd. Stokastiska skydd är mindre lämpliga under sämre

belysningsförhållanden, eftersom den genomsnittliga transmissionen minskar med ökande skyddsförmåga, figur 35. Ett stokastiskt skydd kan emellertid vara användbart som skydd mot de laserpulser som anländer först.⁹



Figur 35 Stokastiska skydd. Teckning: Martin Ek

Hotlasern har pulsrepetitionsfrekvensen 10 Hz respektive 100 Hz. Skyddssannolikheten avtar snabbt med ökande exponeringstid och ökande pulsrepetitionsfrekvens. Skyddsnivån har sjunkit till ungefär 20% efter 3 respektive 0,3 sekunders exponering.

5.3.3 Självaktiverande skydd

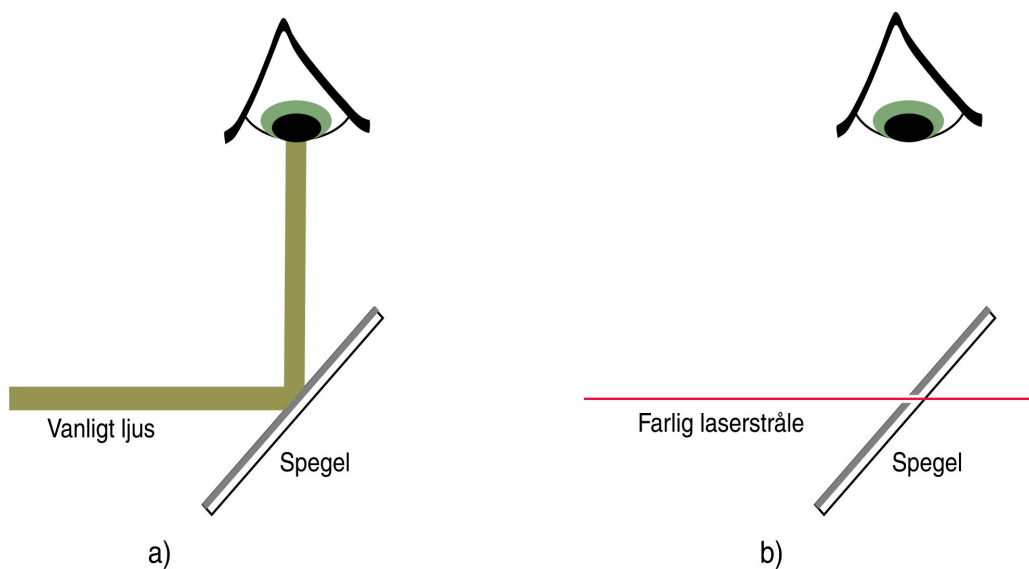
För skydd mot korta, några nanosekunder, oväntade laserpulser duger inte de styrda skydden vars omslagstider i bästa fall ligger i storleksordningen mikrosekunder.

Självaktiverande skydd mot laserstrålning kan automatiskt förändra sina egenskaper utan påverkan från yttre styrsignaler. Skydden innehåller material vars optiska egenskaper ändras beroende på den infallande strålningstätheten. Det är således laserstrålen själv som framkallar de egenskaper som skyddar mot strålen. I de skyddande materialen kan t ex transmissionen eller ljusbrytningen variera med den irradians som träffar materialet, varför dessa material sägs vara optiskt ickelinjära. De ickelinjära effekterna kan vara reversibla eller irreversibla. Reversibla effekter kan användas för framställning av optiska begränsare, d v s anordningar som begränsar den transmitterade strålningstätheten till en maximal nivå. De irreversibla effekterna kan utnyttjas i optiska säkringar, vilka permanent bryter strålningen när strålningstätheten uppnår en viss tröskelnivå.

Ett kriterium för ett bra laserskydd, både för ögon och olika typer av optiska sensorer, är att det ska släppa igenom så mycket ljus som möjligt när ingen laser riktas mot skyddet, dvs när ljusintensiteten är låg eller måttlig. Vid hög ljusintensitet däremot skall skyddet bli svart och blockera den farliga, högintensiva strålningen.

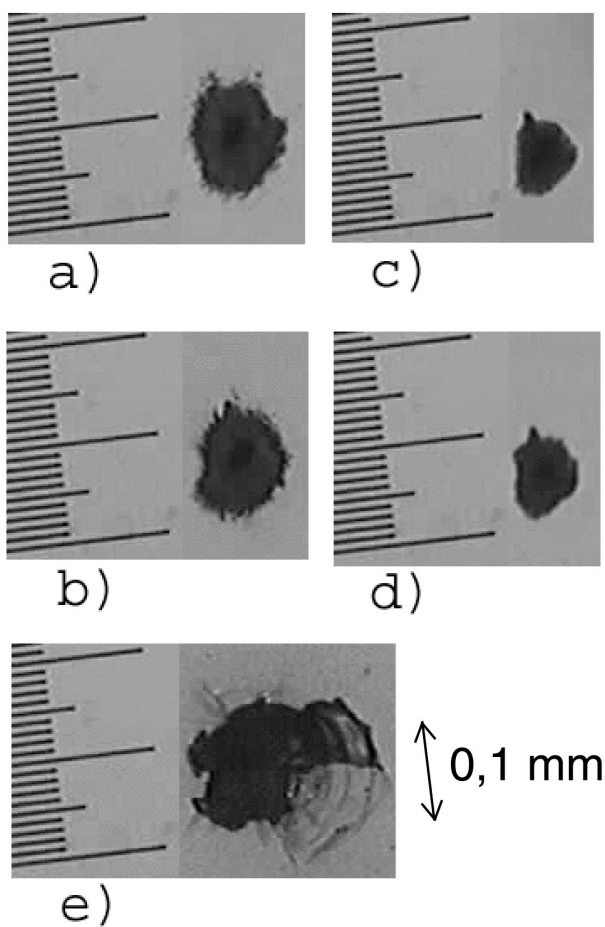
Principen för en optisk säkring visas genom en schematisk skiss i figur 36. En spegel som består av en mycket tunn metallfilm på ett glassubstrat placeras i strålgången. Om en laserpuls med hög energi träffar

spegeln uppvärms den så att metallfilmen förångas och strålen tar en annan väg.¹⁰ Med dagens teknik kan dock inte denna typ av optisk säkring ge ett tillräckligt bra skydd.



Figur 36 Principen för en optisk säkring

Figur 37 visar ett hål som en laser bränt i en spegel som ingår i en testuppställning för en optisk säkring.

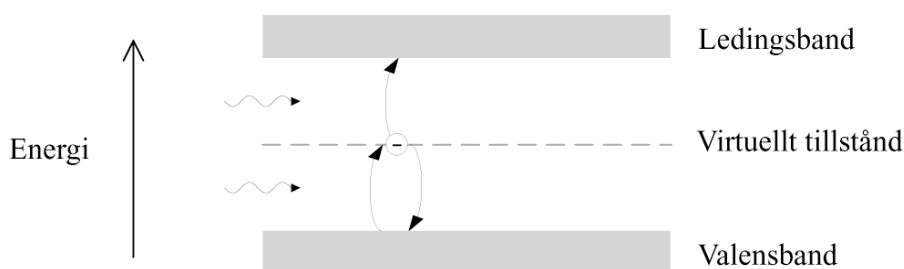


Figur 37 Spegel med hål åstadkommit av laser

Vissa så kallade optiskt icke-linjära material (ILO) har optiskt begränsande egenskaper. I ett normalt, linjärt, material är den optiska responsen proportionell mot det infallande ljusets intensitet, medan brytningsindex och/eller absorptionskoefficient för ett icke linjärt material varierar med ljusintensiteten.

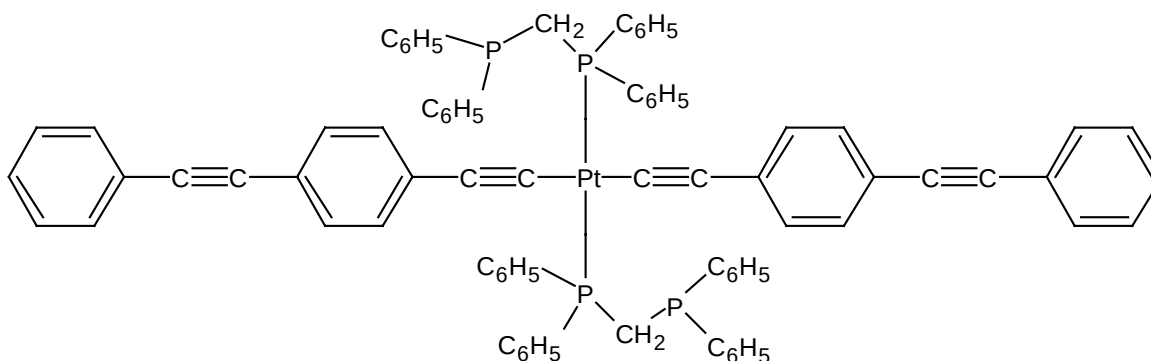
De icke-linjära material som finns idag kräver en mycket hög ljusintensitet för att de icke-linjära egenskaperna ska börja märkas vilket gör att de i ett optiskt system måste placeras nära ett fokalplan.

En icke-linjär effekt som förekommer i laserskyddsmaterial är tvåfotonabsorption. Avståndet mellan de två energivivåerna i figur 38 är större än fotonenergin. Vid mycket hög intensitet, dvs hög koncentration av fotoner, kan två fotoner samverka och tillsammans ge elektronen tillräcklig energi för att komma upp till det exciterade tillståndet.¹¹



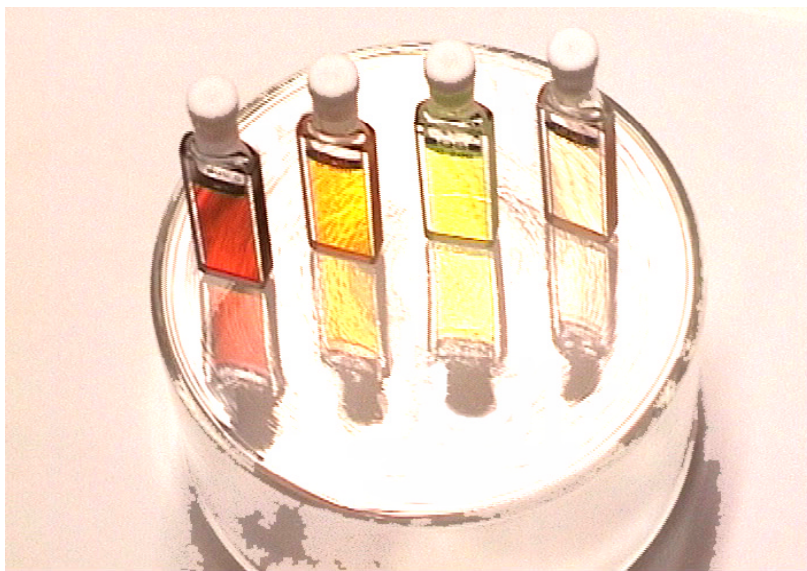
Figur 38 Tvåfotonabsorption

Bra tvåfotonabsorbatorer innehåller ofta konjugerade bindningar, dvs alternarande dubbel och trippelbindningar. En tung metallatom, som i platinaacetyliden i figur 39, förbättrar ofta den optiska begränsningen.



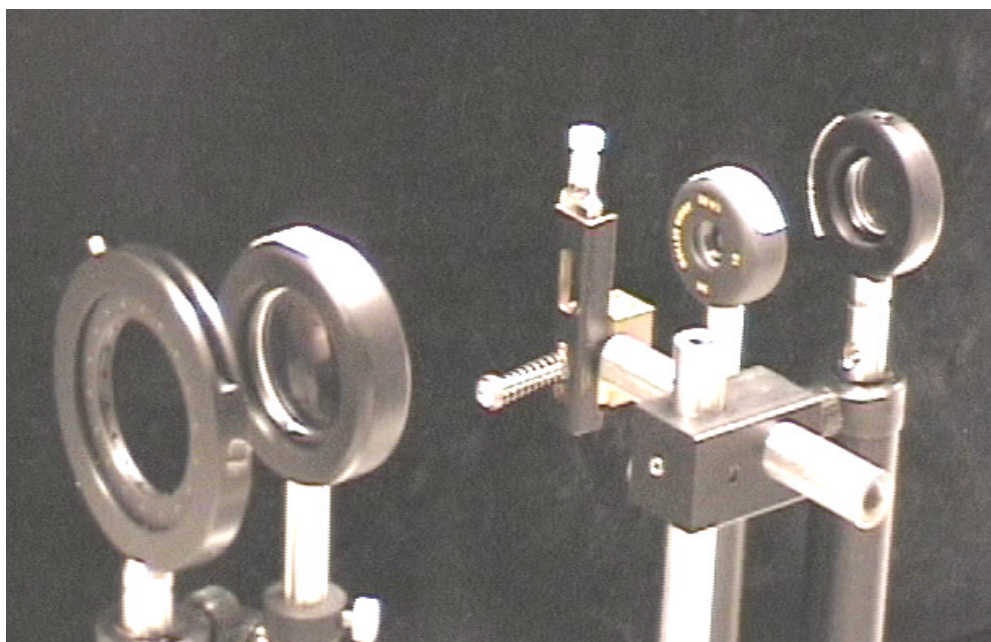
Figur 39 Exempel på icke-linjärt absorberande material

En mängd olika icke-linjära material, med olika linjär transmission och därmed olika färg, kan framställas, figur 40 visar exempel på detta.¹² Normalt hanteras materialen lösta i ett lösningsmedel. Lösningen hålls upp i glaskyvetter.



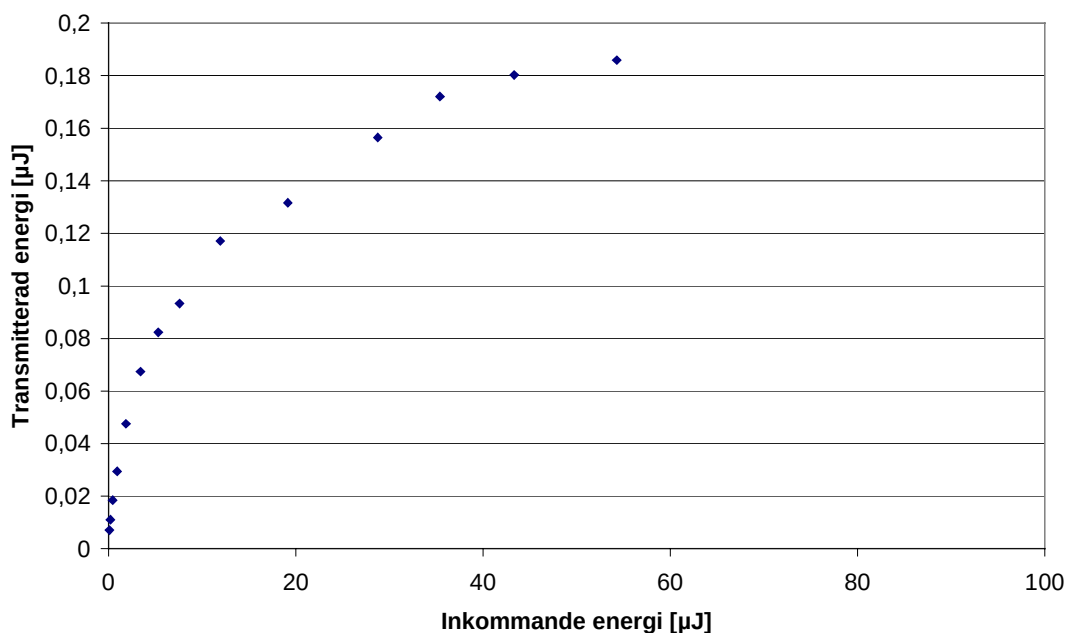
Figur 40 Fyra kyvetter med olika icke-linjära material

De icke-linjära materialen karakteriseras på FOI i en mätuppställning, figur 41, där varje prov placeras i fokus och belyses med en pulsad, våglängdskonverterad YAG-laser, vars våglängd och pulsenergi kan ändras.



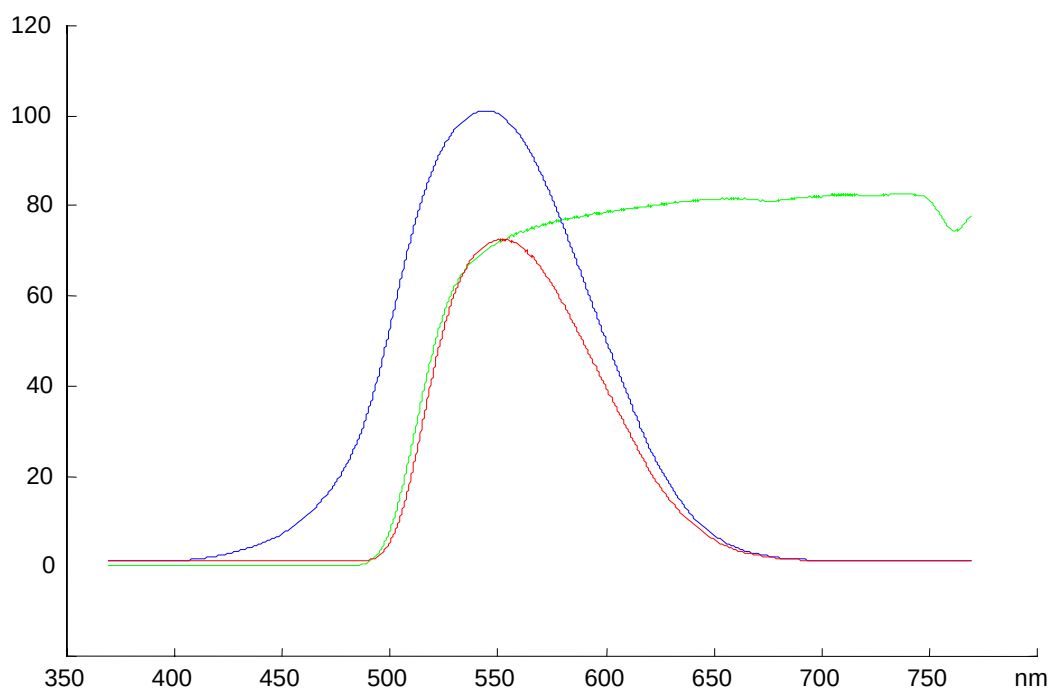
Figur 41 Mätuppställning för karakterisering av OPL-material. Kyvetten med provet är placerad i fokus i bildens mitt. På båda sidor om provet finns linser.

När den transmitterade energin plottas mot den infallande energin erhålls den s k begränsningskurvan, som typiskt kan se ut som i figur 42. Ett linjärt material skulle i samma mätning ge en rät linje som lutar uppåt med konstant vinkel. I det icke-linjära fallet ser vi att kurvan vid höga energier böjer av och går idealiserat mot ett asymptotiskt värde, den s k "clamping level" som aldrig överskrids. Målet är att "clamping level" ska ligga under skadetröskeln för detektorn eller ögat som ska skyddas.



Figur 42 Begränsningskurva för icke-linjärt material

För att bli praktiskt användbart är det viktigt att materialets linjära transmission är så hög som möjligt, speciellt i den del av spektrat där ögats känslighet är som störst. Figur 43 visar ögats känslighetsfunktion (blått), den linjära transmissionen för ett icke-linjärt material (grönt) och ögats försämrade känslighet då det placeras bakom skyddsmaterialet. I detta fall dämpar skyddet ljuset med 27%, vilket i de flesta fall är acceptabelt.



Figur 43 Linjär transmission för icke-linjärt material samt ögats känslighetskurva.

Figur 44 visar hur utsikten från ett laboratorium på FOI försämras om detta skyddsmaterial placeras framför kameran. Vi ser att färgbalansen påverkas, främst genom att blå färgtoner försvinner.



Figur 44 Fotografi taget utan respektive med skyddsmaterialet ovan.

Självaktiverande material kan skydda mot skada till följd av laserstrålning, men är normalt inte användbara som skydd mot störning eftersom det krävs stora effekttätheter för att de ska aktiveras. De strålningsnivåer som kommer i fråga vid störning kan vara av samma storleksordning som nivån hos den strålning som den skyddade sensorn är avsedd att registrera. Strålningsnivåerna vid laserstörning är därmed betydligt lägre än vad som krävs för att aktivera ett självaktiverande skydd, se figur 18. Dagens självaktiverande skydd är heller inte användbara för skydd av oöppnat öga, eftersom hotstrålningen då inte fokuseras före passagen in i ögat.

5.3.4 Skydd mot strukurförstörande högeffektlaser

För skydd mot strukurförstörande högeffektlaser kan de skyddsprinciper som används för skydd mot konventionella vapen ofta vara användbara, d v s kraftigare konstruktioner, tåligare material, bepansring, taktiskt uppträdande etc. De tekniska skydd som här kommer i fråga är till sin natur statiska.

För att uppnå skadlig verkan i en struktur måste laserstrålningen absorberas under en viss tid (i storleksordningen 1–10 sekunder) så att den lokala temperaturen uppnår skadliga nivåer. Verkningarna kan därför minskas genom att minimera tiden under vilken den hotade ytan är utsatt för strålning. I en robot kan detta t ex uppnås genom att robotens skrov får rotera kring sin längsaxel, vilket fördelar strålningsenergin på en större yta. Den lokala upphettningen kan också reduceras genom att använda material med god värmeledningsförmåga.

En möjlighet att begränsa den absorberade energin är att använda en ytbeläggning som har minimal absorption och reflekterar bort större delen av den infallande strålningsenergin. Detta kan dock ge en ökad upptäcktsrisk.

5.4 Aktiviteter på FOI

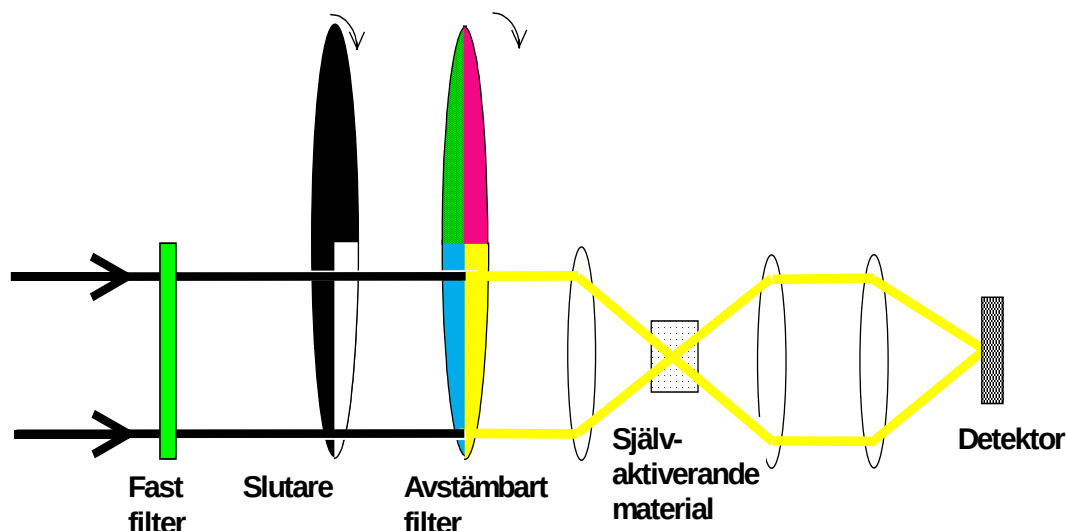
Inom projektet "Skydd mot laser" studeras och utvecklas flera olika skyddsmetoder. Det står klart att ett skydd inte kan täcka in alla typer av hot. Inom det av FMV beställda fotonikprojektet arbetar flera

universitet och högskolor med att få fram bättre styrda och självaktiverande material. FOI följer utvecklingen i det projektet och integrerar resultaten i båda projekten.

Eftersom de optiskt icke linjära skyddsmaterialen måste placeras där strålningstätheten är som störst, utsätts de för stora påfrestningar. För att vara användbara måste de därför ha en hög skadetröskel. Dessutom ställs stora krav på snabbhet, skyddsnivå, optisk kvalitet etc. Intensiv forskning pågår (år 2000) för att finna optiskt icke linjära material som uppfyller dessa krav.

Visionen är att kunna demonstrera ett kombinerat skydd, som utnyttjar de respektive fördelarna med statiska, styrda och självaktiverande skydd. Figur 45 ger exempel på detta. Det fasta filtret tar bort alla våglängder för vilka detektorn inte är känslig. Det är ingen mening med att släppa in dem i systemet. En högenergetisk, kort och oväntad puls tas om hand av det självaktiverande materialet, som sitter i ett mellanfokus. Efter en tid har den aktiva slutaren hunnit reagera och slår till, varvid det självaktiverande materialet skyddas från upphettning. Efter ytterligare en tid har hotlaserns våglängd hunnit analyseras och det avstämbara filtret har då kunnat ställas in att dämpa rätt våglängd. Först därefter kan man åter se genom systemet.

Skydd mot laser i IR-området är ett område som blir allt viktigare i takt med att mängden optroniska system i försvaret ökar. Detta beskrivs i en rapport om skydd mot IR-lasrar.¹³



Figur 45 Kombinerat laserskydd som FOI avser demonstrera 2003.

Ett framtida laserskydd av denna typ medför nackdelar i form av försämrade färgbalans, ljuskänslighet och skärpa. Fasta laserskyddsfiltre av glasögon typ medför också nackdelar i form av försämrade färgbalans. Dessutom finns ett motstånd mot att bara skyddsglasögon under lång tid pga deras vikt och den obekvämlighet som värme och fukt i tätslutande glasögon ger efter en lång tids användning.

Dessa problem är betydligt mindre vid användning av optisk utrustning, som kikare och sikten. Självaktiverande skydd kan placeras i ett redan befintligt fokalplan. Användaren behöver då inte fundera över skyddet utan det är alltid aktivt. Som ett komplement till det självaktiverande skyddet kan ett styrt skydd aktiveras då hot föreligger.

6 Ordlista

Anisotrop Olika för olika riktningar, t ex brytningsindex i ett vätskekristallint material.

Ballistiskt Som har med projektiler att göra. Ballistiskt skydd skyddar mot konventionell beskjutning.

Clamping level Begränsningsnivå, den högsta pulsenergi ett självaktiverande material släpper igenom.

Irradians Strålningseffekt per areaenhet. Mäts i W/m^2 .

Kollimera Samla ihop till ett parallellt strålknippe.

Konjugerad Alternerande enkel- och dubbelbindningar. Med många relativt fria elektroner.

Ledstrålestyrning Styrprincip för robot. Roboten följer en laserstråle mot målet.

Pumpning Att genom energitillförsel förflytta elektroner i ett material till ett exciterat tillstånd.

Q-switch Anordning för att momentant tömma ett pumpat material på energi. Ger hög pulseffekt.

Resonator Kavitet, två mot varandra ställda speglar, eller motsvarande, där ljus förstärks.

Stokastisk, Med slumpmässiga intervall.

Transmission Genomsläpplighet, den andel av ljuset som passerar ett material.

Våglängdskonvertering Icke-linjär process som omvandlar ljus av en våglängd till ljus av en annan.

7 Förkortningar

ADATS	Kanadensisk kortdistansluftvärnsrobot
CW	Continuus wave, kontinuerlig strålning i motsats till pulsad
EO	Elektro-optisk
IR	Infraröd
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LWR	Laser Warning Reciever
MTE	Maximalt Tillåten Exponering
NVG	Night Vision Goggles, bildförstärkare
OD	Optisk Densitet
OPO	Optisk Parametrisk Oscillator
SLM	Spatiell ljusmodulator
UV	Ultraviolett
YAG	Yttrium Aluminium Granat, vanligt lasermaterial

8 Figurförteckning

Figur 1 Theodore Maiman med sin första rubinlaser, 1960. Foto: Hughes Aircraft	6
Figur 2 En lasers uppbyggnad. De två mot varandra riktade speglarna utgör här kaviteten. Teckning: Martin Ek	7
Figur 3 Energinivådiagram Teckning: Martin Ek	8
Figur 4 Några vanligt förekommande lasrar i det elektromagnetiska spektrat. Teckning: Martin Ek	8
Figur 5 Ögats byggnad Teckning: Martin Ek	13
Figur 6 Skiss över kikarkonstruktion	14
Figur 7 Schematisk bild på vad som händer med ljus av olika våglängder som infaller mot ögat. Teckning: Martin Ek	15
Figur 8 Näthinneskada hos människa. Foto: Dr. Carmen A Puliafito, New England Eye Center.	16
Figur 9 Ögonblödning hos gris, orsakad av en 8 mJ rubinlaserpuls. Till vänster före och till höger efter exponering. Foto: Bengt Anderberg ⁵	16
Figur 10 Skada på indiumantimoniddetektor, orsakad av laser.	18
Figur 11 Bild från videokamera bländad av en 1 mW dubblad Nd:YAG laser.	19
Figur 12 Ströljus	19
Figur 13 Det elektromagnetiska spektrat med vattens absorptionsband markerade.	20
Figur 14 Stridsfordon 90 är försett med en Nd:YAG avståndsmätarlaser. Foto: Hägglunds Vehicle	21
Figur 15 I robot 90-systemet styrs roboten av en laserledstråle, diodlaser, nära IR. Photo: Lv 7, Boden	21
Figur 16 Rysk belyningsutrustning med 6 stycken diodlasrar.	22
Figur 17 Laserverkan som funktion av effekt. Teckning: Martin Ek	22
Figur 18 Handhållen laserficklampa som ger 1 W kontinuerlig effekt vid 850 nm.	23
Figur 19 Kinesisk antisensorlaser som visats offentligt vid vapenmessa i Manilla 1995.	23
Figur 20 Indelning av skydd mot laser i kategorier	24
Figur 21 Kriterier vid val av laserskydd	24
Figur 22 Exempel på användning av skenmål som taktiskt skydd mot laser. Teckning: Martin Ek	27
Figur 23 Försvarsmaktens laserskydd från 1966. Nd:YAG laser med dubblare, tripplare och OPO i FOI:s laboratorium i bakgrunden.	28
Figur 24 Exempel på några olika skyddsglasögon	28
Figur 25 Exempel på märkning av skyddsglasögon. Dessa har god dämpning i området 700-1500 nm.	29
Figur 26 Uppmätt transmission för glasögonen i figuren ovan.	29
Figur 27 Färgbalansen försämras av spektrala filter.	30
Figur 28 Indirekt seende. Med "Night Vision Goggles" skyddas ögonen från skada.	31
Figur 29 Principen för styrda skydd mot laser	31
Figur 30 Laservernare av typ LWS-2 från israeliska Amcoram.	32
Figur 31 Ett vätskekristallint material vridet ljusets polarisation.	33
Figur 32 Vätskekristallkomponent	33
Figur 33 Uppmätt omslagstid för en vätskekristallkomponent, i detta fall ca 10 μ s.	34
Figur 34 Transmission för elektriskt avstämbart filter baserat på vätskekristallteknik. De olika kurvorna är uppmätta med olika spänning lagd över komponenten.	34
Figur 35 Stokastiska skydd. Teckning: Martin Ek	35
Figur 36 Principen för en optisk säkring	36
Figur 37 Spegel med hål åstadkommit av laser	36
Figur 38 Tvåfotonabsorption	37
Figur 39 Exempel på icke-linjärt absorberande material	37
Figur 40 Fyra kyvetter med olika icke-linjära material	38
Figur 41 Mätupställning för karakterisering av OPL-material. Kyvetten med provet är placerad i fokus i bildens mitt. På båda sidor om provet finns linser.	38
Figur 42 Begränsningskurva för icke-linjärt material	39
Figur 43 Linjär transmission för icke-linjärt material samt ögats känslighetskurva.	39
Figur 44 Fotografi taget utan respektive med skyddsmaterialet ovan.	40
Figur 45 Kombinerat laserskydd som FOI avser demonstrera 2003.	41

9 Referenser

1. Askelin, J.-I., *Markus väntar runt knuten. framsyn*, 2001(2): p. 4-7.
2. Hecht, *Optics*. 1987, Reading: Addison-Wesley.
3. Moberg, H., et al., *FOI orienterar om elektromagnetiska vapen och skydd*. 2001, Stockholm: Totalförsvarets forskningsinstitut.
4. Arbetarskyddsstyrelsen, *Laser*. Arbetarskyddsstyrelsens författningssamling. 1994, Solna: Arbetarskyddsstyrelsen.
5. Anderberg, B., *Anti-Eye Laser Weapons*, PhD Thesis, University of Göteborg, 1993
6. Försvarmakten, *Säkerhetsinstruktion för vapen och ammunition med mera*. 2000, Stockholm: Försvarets bok- och blankettförråd.
7. Sjöqvist, L., *Laser Induced Damage in Detector Materials and Detectors*, Defence Research Establishment, 1996, FOA-R--96-00281-3.1--SE
8. Kariis, H., et al., *Manufacture and Evaluation of Polymer Dispersed Liquid Crystal Test Components*, Swedish Defence Research Agency, 2001, FOI-R--0247--SE
9. Eliasson, H., Evekull, D., and Kariis, H., *Laserskydd med vätskekristallkomponenter*, Försvarets forskningsanstalt, 2000, FOA-R--00-01537-612--SE
10. Senneryd, P., *Förångning av tunna metallfilmer med laserstrålning*, Swedish Defence Research Agency, 2001, FOI-R--0068--SE
11. Eriksson, A., *Modeling and Characterization of Nonlinear Materials for Protection of Optical Sensors*, PhD Thesis, Linköping University, 2001
12. Nilsson, C., Lopes, C., and Eriksson, A., *Optical Power Limiting Investigation of New Materials*, Försvarets forskningsanstalt, 2000, FOA-R--00-01680-612--SE
13. Hallberg, T., Sjöqvist, L., and Svensson, S., *Protection of Mid-infrared Sensors Against Laser Radiation, Preliminary Report*, Swedish Defence Research Agency, 2001, FOI-R--0152--SE