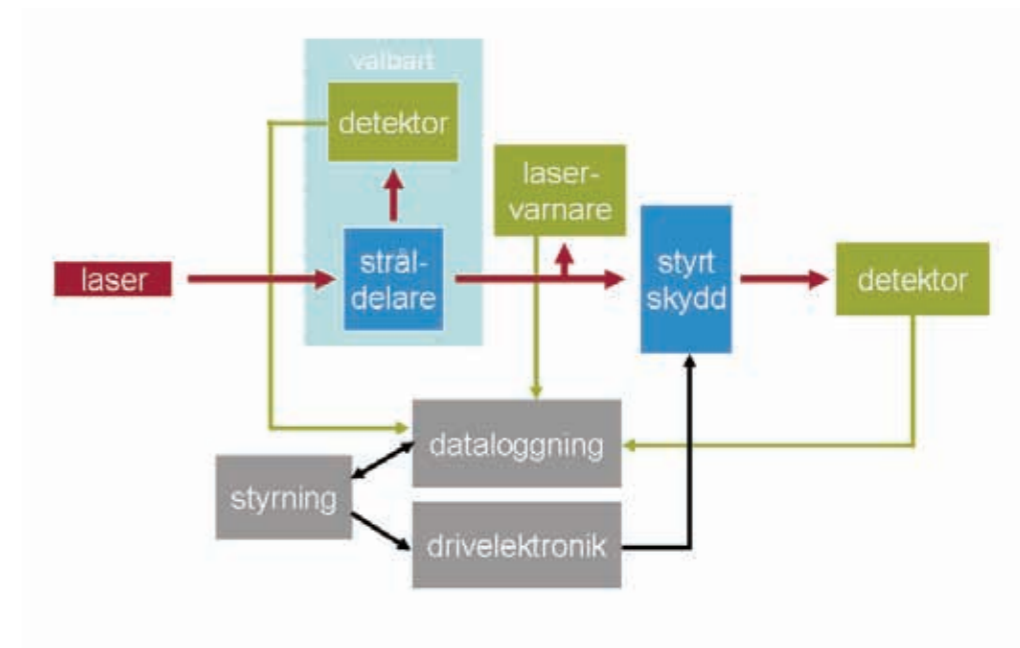


CESAR LOPES, STEFAN BJÖRKERT, SÖREN SVENSSON, JOHAN ÖHGREN



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.

Cesar Lopes, Stefan Björkert, Sören Svensson,  
Johan Öhgren

# Testuppställningar för ut- värdering av laserskyddsfilter och komponenter

Effektivisering av FoU för sensorskydd

Titel	<b>Testuppställningar för utvärdering av laserskyddsfilter och komponenter</b>
Title	Test-beds for evaluation of laser protection filters and components
Rapportnr/Report no	FOI-R--2379--SE
Rapporttyp Report Type	Metodrapport Methodology report
Sidor/Pages	
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2007
ISSN	ISSN 1650-1942
Kund/Customer	FM/Swedish Armed Forces
Forskningsområde Programme area	6. Telekrig och vilseledning 6. Electronic Warfare
Delområde Subcategory	61 Telekrigföring med EM-vapen och skydd 61 Electronic Warfare including Electromagnetic Weapons and Protection
Projektnr/Project no	E3060
Godkänd av/Approved by	Ove Steinvall
FOI, Totalförsvarets Forskningsinstitut Avdelningen för Sensorsystem Box 1165 581 11 Linköping	FOI , Swedish Defence Research Agency Sensor Systems  SE-581 11 Linköping

## Sammanfattning

FOI (fram till 2001 FOA) har under ett femtontal år utvecklat, analyserat och utvärderat laserskydd. De tidigare framtagna testuppställningarna har nu vidareutvecklats och standardiserats för att göra de optiska mätningarna säkrare och enklare. Tre olika testuppställningar har utvecklats/byggt upp; testuppställning för utvärdering av styrda och statiska skydd, testuppställning för utvärdering av självaktiverande skydd och testuppställning för utvärdering av självaktiverande skydd med militära optiska system. Testuppställningen för utvärdering av styrda och statiska skydd följer den amerikanska militära standarden, som är kompatibel med den europeiska standarden. Omslagstider för de styrda skydden, dvs. tid från öppet till skyddande tillstånd, mäts enligt VESAs (Video Electronics Standards Association) standardprocedur, men anpassas till de förhållanden som gäller för styrda laserskydd. De självaktiverande laserskydden analyseras enligt en NATO-standard.

Med dessa testuppställningar är det möjligt att analysera/utvärdera de olika typer av laserskydd under utveckling och de statiska skydd som finns kommersiellt tillgängliga. Framför allt kan följande parametrar bestämmas:

- Dämpning; skyddens förmåga att minska transmitterat laserljus.
- Avstämbbarhetsgrad (styrda skydd); styrning av den våglängdsberoende transmittansen.
- Bredbandighet (självaktiverande skydd); De självaktiverande skyddens förmåga att skydda en optisk sensor inom hela dess arbetsområde.
- Snabbhet (styrda skydd); tid mellan detektion av laserljus till omslag till skyddande tillstånd.
- Spektral transmission inklusive fotopisk transmission.
- Vinkelberoende; skyddens transmittans beroende av ljusets infallsvinkel.
- Skadenivå; laserenergin vid vilken skada uppstår på skyddet.

Testuppställningarna kan, förutom att användas för att testa de skydd som tas fram inom FoU-verksamheten, också användas för att bistå andra inom FM eller civila intressenter med mätningar/verifieringar av laserskydd. Styrelektronik och styrprogram som utvecklats av FOI kan användas vid fälttester och vidareutvecklas, dvs. anpassas till enskilda laserskydd, för snabbare och säkrare tillämpning i fält.

Nyckelord: Laserskydd, testuppställningar, styrda skydd, självaktiverande skydd, statiska skydd, optiska begränsare.

## Summary

Since the early nineties FOI has developed and evaluated laser protection devices. The earlier developed test-beds have now been further enhanced and standardised to secure the optical measurements and to simplify the evaluation procedure. Three different test-beds have been designed and built; a test-bed for studying agile and static protection devices and two test beds for studying self-activated protection devices – one for large aperture lenses and one for smaller aperture lenses. The test-bed for studying agile and static devices meets the requirements of the American military standard, which is compatible with the European standard. Switching time for the agile devices, *i.e.* the time between open and closed state, is measured according to VESA (Video Electronics Standards Association) standard procedure but adapted to the conditions for laser protection. Optical limiting (self-activated) protection devices are analysed in accordance with a NATO-standard.

With these test beds it is possible to analyse/evaluate all the different types of laser protection devices under development and static protection devices that are commercially available. Above all the following parameters can be quantified:

- Attenuation; ability of the protection devices to reduce the transmitted laser light.
- Tunability (agile protection devices); control of the spectral transmittance.
- Broadband optical limiting performance (self-activated protection devices).
- Switching time (agile protection devices); time from laser light detection to attain a protective state (closed).
- Spectral transmission including photopic transmission.
- Angular-dependency; the degree of transmittance with respect to the angle of incidence for the light in the protection devices.
- Damage threshold; laser energy at which irreversible damage occurs in the device.

Apart from being used to test the protection devices developed, the test-beds can also be used to assist other departments within the Swedish Armed Forces or civilian stakeholders with measurements/evaluations of laser protection devices. Control electronics and software developed by FOI can be used in field-tests and can be further developed, *i.e.* customised for a particular protection device for a faster and more secure use in the field.

Keywords: laser protection, test-beds, agile protection devices, self-activated protection devices, static protection devices, optical limiters.

# Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>6</b>
1.1	Standarder .....	7
1.1.1	Civila standarder inom laserskyddsområdet .....	7
1.1.2	Militära standarder inom laserskyddsområdet.....	8
1.1.3	Andra relevanta standarder .....	9
1.1.4	Slutkommentar angående standarder.....	10
1.2	Tekniska skydd.....	11
1.2.1	Statiska skydd .....	11
1.2.2	Smarta självaktiverande skydd mot laserskador .....	12
1.2.3	Avancerade avstämbara styrda skydd mot laserbländning .....	13
<b>2</b>	<b>Testuppställningar för utvärdering av smarta självaktiverande laserskydd</b>	<b>14</b>
2.1	Beskrivning av testuppställningar .....	15
2.1.1	Pulsenergireglering.....	16
2.1.2	Strålkvalitetsfiltrering .....	16
2.1.3	Strålvidgare och testad optik med okular .....	17
2.1.4	Sensoroptik och transmissionssensor.....	19
2.1.5	Uppställningens mätkapacitet .....	20
<b>3</b>	<b>Testuppställning för utvärdering av statiska laserskydd och avancerade styrda laserskydd</b>	<b>22</b>
3.1	Beskrivning av testuppställningen.....	22
3.2	Test av dämpningsförmågan .....	23
3.3	Anpassning av dämpning till rätt våglängdsintervall.....	24
3.4	Test av olika infallsvinklar och polarisationer .....	24
3.5	Test av omslagstid och exponeringstid .....	24
3.6	Aktivering med laservarnare eller manuell aktivering .....	25
3.7	Uppställningens mätkapacitet.....	25
3.7.1	Mätkapacitet avseende skadenivå och dynamisk skyddsomfång .....	25
3.7.2	Mätkapacitet avseende omslagstider.....	26
<b>4</b>	<b>Slutsatser</b>	<b>27</b>
	<b>Bilaga A – Bruksanvisning för begränsarmätningar</b>	<b>28</b>
	<b>Bilaga B – Optiska komponenter för testuppställningen för statiska laserskydd och styrda laserskydd</b>	<b>29</b>

# 1 Inledning

FOI har under ett femtontal år utvecklat, analyserat och utvärderat laserskyddsfilter. Experimenten har gjorts i olika testuppställningar. Under det senaste året har fokus varit mot att utveckla och standardisera våra testuppställningar för att göra de optiska mätningarna säkrare och enklare. Testuppställningarna kan, förutom att användas för att testa de skydd som tas fram inom projektet, också användas för att bistå andra inom Försvarsmakten eller civila intressenter med mätningar/verifieringar av laserskydd.

Den här rapporten beskriver tre olika testuppställningar som har utvecklats, eller byggts upp enligt en NATO-standard<sup>1</sup>:

1. Testuppställning för utvärdering av styrda och statiska skydd
2. Två testuppställningar för utvärdering av självaktiverande skydd (optiska begränsare) enligt NATO-standard.
  - En testuppställning för objektiv med stor apertur.
  - En testuppställning för objektiv med mindre apertur. Denna uppställning är en förbättrad ekvivalent version av den standardiserade NATO-testuppställning som vi använt under ett tiotal år.

NATO-testuppställningen togs fram för att göra det möjligt för forskarna att jämföra resultat från självaktiverande skydd oberoende av var experimenten är gjorda. I övrigt följer testuppställningen för utvärdering av styrda och statiska skydd de gängse standarder som finns (se avsnitt 1.1 sid. 7). Vi har också möjlighet att kombinera komponenter för självaktiverande och styrda skydd under våra mätningar. Detta för att se hur de olika skydden påverkar varandra när de kombineras till ett system. Självaktiverande skydd kan ge skydd mot skada men inte bländning/störning, medan styrda skydd främst ger skydd mot bländning/störning. Avsnitt 1.2 (sid. 11) beskriver de olika skyddsmöjligheterna.

Med dessa testuppställningar är det möjligt att analysera/utvärdera de olika typer av laserskydd som är under utveckling och de statiska skydd som finns kommersiellt tillgängliga. Framför allt kan följande parametrar bestämmas:

- Dämpning; OD (optisk densitet) och "clamping level" (se avsnitt 1.2 sid. 11)
- Avstämbarhet (styrda skydd); styrning av våglängdsberoende transmittans
- Bredbandighet (självaktiverande skydd)
- Snabbhet (styrda skydd); tid för omslag från laserdetektion till skyddande tillstånd
- Spektral transmission inklusive fotopisk transmission
- Vinkelberoendet; skyddets transmittans beroende av ljusets infallsvinkel
- Skadenivå; laserenergin vid vilken skada uppstår på skyddet

En kort beskrivning av de olika typer av tekniska laserskydd (självaktiverande och styrda skydd), som är under utvärdering eller utveckling och karakteriseringen med hjälp av testuppställningarna, finns i avsnitt 1.2 nedan liksom en kort beskrivning av kommersiellt tillgängliga statiska skydd. En genomgång av olika relevanta standarder ges under avsnitt 1.1. Kapitel 2 behandlar testuppställningar för utvärdering av självaktiverande skydd och kapitel 3 behandlar en testuppställning för utvärdering av styrda och statiska skydd. Rapporten avslutas med de slutsatser som dragits under uppbyggnaden av testuppställningarna.

<sup>1</sup> a) Vincent, D., Nonlinear Optics 21, 413, 1999, b) James, D. B., McEwan, K. J., Nonlinear Optics 21, 377, 1999.

Erfarenheterna från framtagningen av styrenheter och datorprogram kommer att utnyttjas vid fältdemonstrationer och miniatyrisering/anpassning av komponenter till enskilda skydd.

## 1.1 Standarder

Under uppbyggnaden av mätresurser för statiska och styrda laserskydd genomfördes en genomgång av standarder som berör laserskydd med avseende på prestanda samt uppmätning av prestanda. Detta för att våra mätrutiner i möjligaste mån, rent mättekniskt, ska följa dessa standarder.

### 1.1.1 Civila standarder inom laserskyddsområdet

Internationella standarder upprättade av det internationella standardiseringsorganet ISO beskriver hur skyddsglasögon ska vara beskaffade för att ge ett fullgott skydd både optiskt och fysiskt, samt hur deras optiska egenskaper ska vara för att inte störa bäraren under arbetsutövningen. Dessa standarder, som är numrerade från ISO 4849 till och med ISO 4856, har dock en uttalad begränsning i det att denna standardserie inte gäller skydd mot laserbelysning. Emellertid finns en standard, ISO 6161; *Personal eye-protectors – Filters and eye-protectors against laser radiation*, som kompletterar de förstnämnda och som riktar sig mot laserskydd. Dock görs hänvisningar till ISO 4849; *Personal eye-protectors – Specifications*, ISO 4854; *Personal eye-protectors – Optical test methods* och ISO 4855; *Personal eye-protectors – Non-optical test methods* i denna standard då dessa ställer krav på den optiska (och den fysiska) beskaffenheten så att de inte optiskt förvränger verkligheten för användaren.

Utöver dessa internationella standarder finns också europeiska standarder på området. Dessa är i sin tur översatta av respektive medlemsland ( däribland Sverige) till en nationell standard. ISO 4849 till och med ISO 4856 motsvaras av EN 166 till och med EN 171 samt EN 207 och EN 208 som motsvarar ISO 6161. Till skillnad från ISO-standarderna som härstammar från slutet av 70-talet till början av 80-talet (1978 – 1982) är de europeiska standarderna uppdaterade så sent som mellan 1998 och 2002. De internationella och de europeiska standarderna har stora likheter men de skiljer i en del gränsvärden som tillåts samt att den europeiska använder sig av tre våglängdsintervall (180 nm – 315 nm, >315 nm – 1400 nm och >1400 nm – 1000 µm) medan de internationella inskränker sig till två (200 nm – 1400 nm och >1400 nm – 1000 µm) inom vilka gränsvärden definieras. Dessutom har man en modernare indelning av olika lasertyper i de europeiska standarderna. Mot bakgrund av att de europeiska utgåvorna är nyare samt att dessa är de civila standarder som gäller i Sverige måste de ses som mest relevanta. Vi har därför valt att enbart beskriva dessa, i relation till en optisk mätuppställning, mer ingående i följande stycken.

Den standard som är mest relevant är alltså EN 207:1998; *Personal eye-protection – Filters and eye-protectors against laser radiation (laser eye-protectors)* och är den som kommer i huvudsak att beskrivas men även andra standarder som refereras i denna behandlas. Det första som bör noteras är att för att uppfylla standarden ska 16 skydd eller fler testas. skydden ska testas med normal infallsvinkel (vinkelrätt infall) utom i de fall då skyddens spektrala transmittans är vinkelberoende. Skydd vars spektrala transmittans är vinkelberoende ska testas med infallsvinklar mellan 0° och 30° för skydd med vinkelberoende i våglängdsområdet 400 nm till 1400 nm och mellan 0° och 90° för skydd med vinkelberoende i andra våglängdsområden. I båda fallen av vinkelberoende ska polariserat ljus användas och det högsta värdet på transmittansen motsvara skyddets skyddsförmåga. Energin för skydds-nivåmätningar fås ur Tabell 1 i EN 207:1998. För utvärdering av skyddens ljusgenomsläpplighet ska en standard D65 ljuskälla användas, dvs. en dagsljuskälla, i normal infallsvinkel (vinkelrätt infall). Skyddets fysiska motståndskraft mot laserljus ska utvärderas, i första hand, med hjälp av en kontinuerlig (cw) laserstråle. En pulsad laser med en lägsta pulsrepetitionsfrekvens på 5 Hz ska användas om en



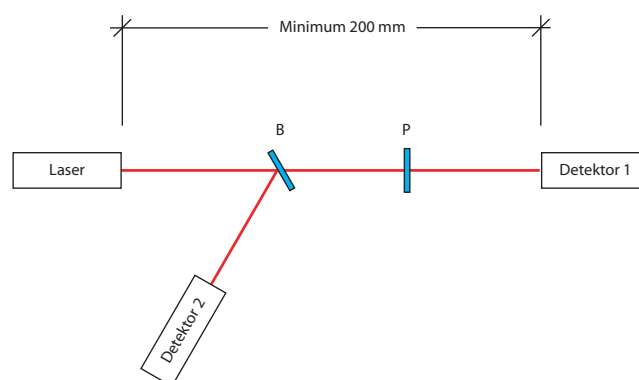
cw-laser inte finns att tillgå i det aktuella våglängdsbandet. Om filtret även ska ha skyddsförmåga för andra lasertyper (pulsad laser, Q-switchad pulsad laser och modkopplad pulsad laser) ska även dessa användas. Ett skydd ska tåla en 10 sekunders exponering av en cw-laser eller 100 pulser i de fall pulshade lasersystem används (se Tabell 4 i EN 207:1998). Energin för dessa mätningar fås ur Tabell 1 i EN 207:1998. Dessutom ska laserljusets diameter vara  $\geq 0,5$  mm för laserpulser  $< 1$  ns. Vid alla andra mätningar ska laserljusets diameter vara  $\geq 2$  mm. En diameter på laserljuset mellan 0,5 mm och 2 mm kan accepteras om irradiansen  $E(d)$  eller energitäthet  $H(d)$  vid denna diameter har ökats, enligt specificerad formel, mot de nominella värdena på  $E_n$  eller  $H_n$  (se EN 207:1998).

Förutom de ovan nämnda rent laserskyddsmässiga utvärderingarna ska även skyddens brytningsförmåga, kvalitén på bulkmaterialiet och ytan, mängd diffust ljus, UV-stabilitet samt flamsäkerhet kontrolleras.

### 1.1.2 Militära standarder inom laserskyddsområdet

På det militära området finns en Amerikansk detaljerad specifikation MIL-DTL-62422C(AT); *Filter, laser hazard protection* utfärdad av US Department of Defense. I denna specifikation beskrivs en standardiserad metod för utvärdering av skydd till optiska sikten. Noteras ska också att denna specifikation gäller huvudsakligen skydd mot rubinlaser, dvs. våglängden 694 nm, men täcker även in 1048 nm – 1068 nm. Metodbeskrivning i den här standarden ärenbart koncentrerad till 694 nm. Förutom den ovan nämnda standardiserade testuppställningen finns även en internationell metod för mer standardiserade materialtester (NATO-standard) som växte fram under 1990-talet. Denna uppställning finns beskrivet i tidigare rapporter<sup>2</sup> och kommer därför inte att beskrivas i mer detalj i detta avsnitt. Dock ges en del detaljer i kapitel 2 (sid. 14) där förbättringar av NATO-test-beden diskuteras. Följande diskussion kommer därför att röra endast specifikationen MIL-DTL-62422C(AT).

En schematisk bild av den mätuppställning som används i denna metod finns beskrivet i Figur 1. Denna ska kalibreras med hjälp av National Institute of Standards and Technology (NIST) filter med optisk densitet 3 till 4 (OD3-OD4).



Figur 1. Schematisk bild av testuppställningen i specifikationen MIL-DTL-62422C(AT). B är en kalibrerad stråldelare och P är provet. Detektor 1 är provdetektor medan Detektor 2 är referensdetektor.

<sup>2</sup> Sören Svensson, Bengt Ericson, Cesar Lopes och Anders Eriksson, *Testuppställning för material och komponenter till skydd mot laser*. Startrapport. FOA-R--99-01326-612--SE, december 1999.

Detektorernas känslighetskurva ska vara känd för normalt infallande ljus i de relevanta våglängdsområdena. Dessutom ska detektorn ha ett signal-till-brusförhållande på 10 eller mer och vara placerad minst 200 mm ifrån lasern. Laserskyddsfiltren ska belysas med en linjärpolariserad laserstråle (P- polariserat med ett minsta förhållande mellan P och S på 100:1), kollimerad till  $4,8 \pm 1,7$  mm i diameter. Brusnivån ska tas av medelvärdet från 100 pulser av rubinlaserns blixtlampa utan att Q-switchen är på, dvs. utan laserljus, och utan laserskyddsfiltret i strålgången.

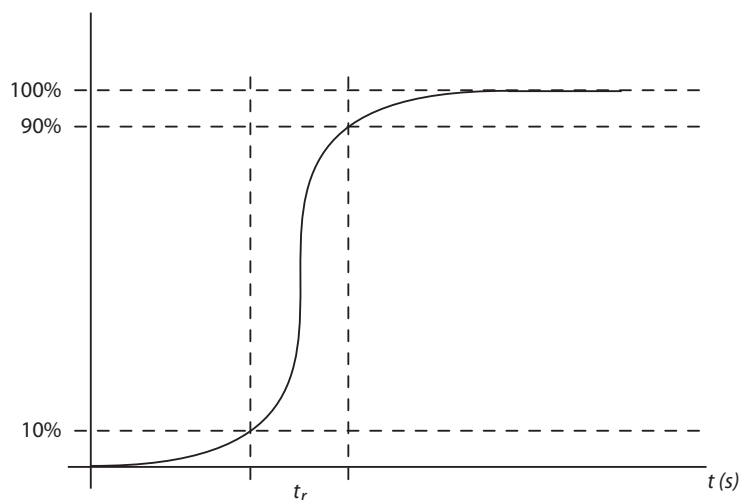
Skyddsfiltren ska testas med 100 laserpulser och minsta värdet ska då vara åtminstone 1,5 tiopotenser över den uppmätta brusnivån. Medelvärdet från dessa 100 pulser utgör transmissionvärdet för ett skyddsfiltret. Två mätningar ska göras. I den första ska skyddsfiltret placeras med sin normal  $2 \pm 1,5$  grader mot det infallande ljuset. I den andra ska skyddsfiltret vara placerat så att dess normal är  $80 \pm 1,5$  grader mot det infallande ljuset.

Förutom den laserskyddsmässiga utvärderingen ska den fotopiska transmissionen bestämmas inom våglängdsintervallet 380 nm till 760 nm (ett våglängdsintervall som innehåller 400 nm och 700 nm kan accepteras) i en kalibrerad spektrofotometer med dubbelstråle.

Utöver ovanstående egenskaper ska även färgning, upplösningsförmåga, filterbeläggningens hållbarhet, ytkvalitet, termisk stabilitet och miljömässig slitstyrka utvärderas enligt denna specifikation.

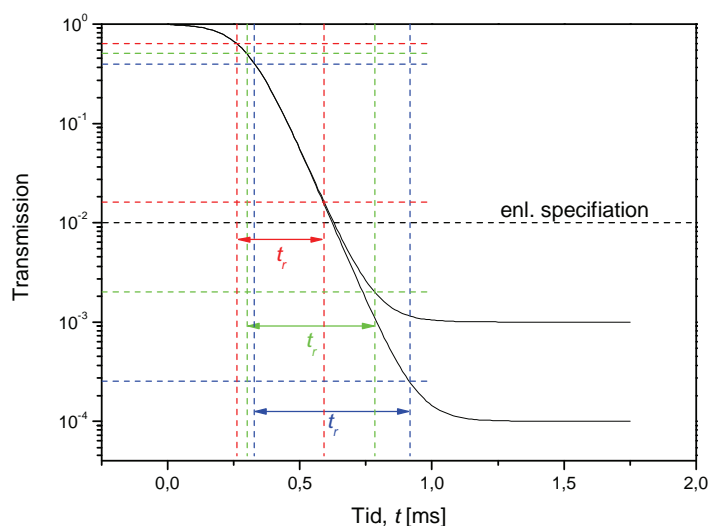
### 1.1.3 Andra relevanta standarder

När det gäller styrda laserskydd så är, förutom skyddsfaktorn (dämpningen), även omslagstiden intressant. Dessvärre finns ingen tillgänglig standard för styrda skydd och därmed ingen definierad metod för att mäta upp omslagstider. I det närliggande optronikområdet "displayer" har Video Electronics Standards Association (VESA) tagit fram en standard för specifikation samt testprocedurer: *Display Specification and Test Procedures Version 1.0, Rev. 1.0*. I denna finns definierat stig- och falltider (Rise and Fall Times) som ett mått på omslagstiden i visuella skärmar. Den definieras som tiden det tar för en pixel att slå om från "vit" till "svart" nivå eller tvärtom. Man använder sig av 10%- och 90%-värden som definition av omslagstiden, se Figur 2. Detta motsvarar den situation som råder för styrbara laserskyddsfiltret.



Figur 2. Illustration av definitionen omslagstiden,  $t_r$ .

Även om visuella displayer och laserskydd rent materialtekniskt påminner om varandra kan det diskuteras om dessa 10%- och 90%-värdena på en linjär skala är relevanta i en skyddssituation. Detta speciellt då skyddsverkan på ett filter mäts i optisk dämpning (OD) som är en logaritmisk enhet (se avsnitt 1.2.1 sid. 11). Därför vore det bättre att använda 10% och 90% värdena på den logaritmiska skalan istället. En annan aspekt är också vilket 100% värde som ska användas. Det är kanske inte skyddsfiltrets absoluta maxvärde (det OD-värde skyddsfiltret når efter oändligt lång styrsignal) som är av intresse. I ett skyddssammanhang är det tiden till man nått den nivå som finns i specifikationen som är av intresse. För att exemplifiera, låt oss ta två skyddsfiltret ett som når maxvärdet på OD3 och har en omslagstid på ca. 0,5 ms (90% på den logaritmiska skalan) och ett annat som når 90% värdet av OD4 på ca. 0,6 ms. Enligt specifikationen behövs en skyddsnivå på OD2, och att nå 90% värdet (OD1,8) kan gå lika snabbt för båda skyddsfiltren, ca. 0,3 ms som i det här exemplet (se Figur 3). För laserskyddsfiltret kan det alltså vara på sin plats att använda 10- och 90-procent värden på den logaritmiska skalan och relatera dessa till den specificerade skyddsnivån.



Figur 3. Illustration på en alternativ definition av omslagstiden,  $t_r$ . Röd streckade linjer representerar 10% och 90% värdena enligt specifikation medan de gröna och blåa representerar dessa värden för fallen med skyddsfiltret med maxvärden på OD3 respektive OD4.

#### 1.1.4 Slutkommentar angående standarder

Den metod som finns beskriven i den av US Department of Defense utfärdade detaljerade specifikationen MIL-DTL-62422C(AT) är kompatibel med den Europeiska standarden EN 207:1998, dvs. följer man denna metod så följer man även den Europeiska standarden. Därför har FOI valt att ha en uppställning (se avsnitt 3.1 sid. 22) som motsvarar den i MIL-DTL-62422C(AT) då denna är kompatibel med EN 207:1998. Samtliga komponenter i FOIs uppställning är kontinuerligt kalibrerade enligt gängse standard och därmed följer FOI både MIL-DTL-62422C(AT) och EN 207:1998 när det gäller rena laserskyddsmätningar.

När det gäller andra delar i EN 207:1998 ska ljusgenomsläpplighet, skyddsfiltrens brytningsförmåga, kvalitén på bulkmaterial och ytan, mängd diffust ljus, UV stabilitet och

flamsäkerhet kontrolleras. Enligt MIL-DTL-62422C(AT) ska fotopisk transmission, färgning, upplösningsförmåga, filterbeläggningens hållbarhet, ytkvalitén, termisk stabilitet och miljömässig slitstyrka kontrolleras. En del av detta görs idag rutinmässigt på FOI i enlighet med både EN 207:1998 och MIL-DTL-62422C(AT). Dock kommer vi inte att gå in på dessa i denna rapport eftersom det ligger utanför ramen för rapporten.

Hur tillämpliga dessa standarder är i det militära fallet kan diskuteras. Detta speciellt i fallet EN 207:1998 som har som utgångspunkt, och begränsning, till laserskyddsglasögon för laboratoriemiljö där till exempel laserstrålarna kan vara mm-smala. Ljusets effekttäthet kan då vara storleksordningar högre i laboratoriet än ute i fält. För att nå dessa effekttätheter i fält krävs riktiga högenergilasrar vilka knappast behöver ingå i antisensorlaserhotbilden. Den amerikanska MIL-specifikationen är inskränkt till några få våglängdsområden som är alltför begränsande för dagens laserfara på slagfältet.

## 1.2 Tekniska skydd

Tekniska skydd delas vanligen in i:

- Statiska skydd,
- Styrda skydd, och
- Självaktiverande skydd

Gemensamt för dessa skydd mot laser är att de bygger på filtrering av optisk strålning (ljus). Forskning inom laserskydd bedrivs främst inom styrda och självaktiverande skydd. En kort beskrivning av de olika skydd och de experimentella parametrar som behöver tas fram innan man kan börja fälttesta dem ges nedan.

### 1.2.1 Statiska skydd

Den enda typen av skydd mot laser som idag finns kommersiellt är så kallade statiska skydd (fasta spektrala filter). De kan ge skydd mot både skada och bländning. Men deras skyddsverkan är förutbestämd till vissa specifika våglängdsband, till skillnad mot avancerade avstämbara skydd som anpassar sig efter hotet. Statiska skydd finns som t.ex. glasögon och skärmar/fönster. Statiska skydd för synliga våglängder är oftast starkt färgade med en visuell transmission på ~20-45 %, och en optisk densitet (OD) >5 (optisk densitet =  $-\text{Log} [\text{transmission}]$ , vilket för OD 5 innebär 0,001 % transmission)<sup>3</sup> i de våglängder där skyddet ska vara aktivt. I våra testupställningar för statiska skydd har vi möjlighet att mäta:

- Dämpning, minst OD 6 (dvs. minst 0.0001 % transmission)
- Spektral transmission inklusive fotopisk transmission
- Vinkelberoendet; skyddens transmittans beroende av ljusets infallsvinkel
- Skadenivå; laserenergin vid vilken skada uppstår på skyddet

Till vår hjälp finns avstämbara lasrar, detektorer och spektrometrar. Även om de visuella våglängderna prioriteras finns möjlighet att även göra mätningar inom NIR-MWIR.

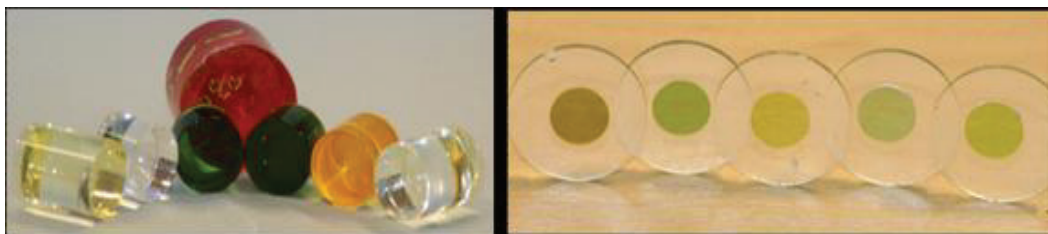
---

<sup>3</sup> Se exempelvis [www.lasernet.com](http://www.lasernet.com).

## 1.2.2 Smarta självaktiverande skydd mot laserskador

Utvecklingen inom laserskydd går mot smarta självaktiverande skydd<sup>4</sup>. Optiskt icke-linjära material som reagerar på laserljus och mörknar utgör basen i dessa nya smarta avancerade skyddsfilter. För att laserljuset ska aktivera skyddet krävs relativt höga intensiteter vilket uppnås genom att fokusera ljuset i filtret. När optiskt icke-linjära material belyses med laserljus reagerar de ögonblickligen och absorberar ljuset genom en icke-linjär process, och absorptionen ökar med intensiteten. Den transmitterade energin når slutligen en maximal nivå vilken inte ökar nämnvärt med intensiteten ("clamping"). Projekt inom Nanotekprogrammet har som mål att nå en clamping på 1  $\mu\text{J}$ , från nanosekunds upp till 1 mikrosekunds laserpulser, med relativt hög fotopisk transmission (>50%). Den transmitterade energin från självaktiverande skydd kan dock orsaka att en optisk sensor störs/bländas.

Intresset är störst för skydd av optiska sensorer som arbetar inom Vis-NIR. För projektet inom Nanotekprogrammet är det främst självaktiverande skydd för ögon som eftersträvas<sup>5</sup>. De självaktiverande skydden kan framställas genom att dopa glasmaterial med de optiskt icke-linjära enheterna. De dopade glasmaterialen kan kapas och poleras till en hög optisk kvalitet (Figur 4).



Figur 4 Självaktiverande optiska skydd som FOI har tagit fram i samverkan med våra samarbetspartners. De dopade glasmaterialen (vänster) kapas och poleras (höger) till hög optisk kvalitet. .

Verksamhet av den här typen finns idag främst hos olika försvarsforskningsorganisationer runt om i världen.

I våra testuppställningar för självaktiverande skydd har vi möjlighet att mäta:

- "Clamping" nivå (dvs. den maximalt transmitterade energin)
- Bredbandighet (dvs. "clamping" nivå för relevanta våglängder, skyddsfiltrets arbetsområde)
- Spektral transmission inklusive fotopisk transmission
- Vinkelberoende; skyddets transmittans beroende av ljusets infallsvinkel
- Skadenivå; laserenergin vid vilken skada uppstår på skyddet

Clamping-nivån mäts enligt en NATO standard<sup>6</sup>.

Till vår hjälp finns avstämbara lasrar, detektorer och spektrometrar, med möjlighet att göra mätningar inom Vis-MWIR.

<sup>4</sup> Se exempelvis Cesar Lopes m. fl, "Swedish Nanohybrid Optical Protection Initiative", FOI Memo 1733 och 1910, 2006.

<sup>5</sup> Se exempelvis Cesar Lopes m. fl, "Swedish Nanohybrid Optical Protection Initiative", FOI Memo 1733 och 1910, 2006.

<sup>6</sup> a) Vincent, D., Nonlinear Optics 21, 413, 1999, b) James, D. B., McEwan, K. J., Nonlinear Optics 21, 377, 1999.

### 1.2.3 Avancerade avstämbara styrda skydd mot laserbländning

Som beskrevs ovan är det mycket svårt att uppnå skydd mot bländning/störning med självaktiverande skydd. För att uppnå en tillräcklig dämpning, och undvika bländning/störning krävs istället styrda skydd. Avancerade styrda skydd kan dessutom göras avstämbara. Inom projektet arbetar vi med två typer av styrda skydd; snabba avstämbara och ultrasnabba av/på (icke avstämbara) skydd. En orsak till detta är att det blir mycket svårt att nå en tillräcklig snabbhet, inom den närmaste tiden, med de avstämbara skydden. En ultrasnabb slutare minimerar risken att skadas av flera pulser, som var och en i sig inte orsakar skada men pga. en ackumulerande effekt ändå skadar sensorn. Det ultrasnabba optiska skyddet skyddar sensorn under den korta tid det tar för det avstämbara skyddet att börja verka. Därefter kan det ultrasnabba skyddet återgå till ”öppet tillstånd”, och endast det avstämbara skyddet verkar. Resultatet blir en hög visibilitet för användaren. Processerna bör bli såpass snabba att en användare inte störs nämnvärt. De tekniska lösningarna på de två skyddstyperna, ett snabbt avstämbart skydd och ett ultrasnabbt skydd, bygger på ny vätskekristallteknik och nanoteknik.

Det avstämbara skyddet bygger på kolesteriska vätskekristaller. Laserskydds-komponenter med den här tekniken blir polarisatorberoende. Man kan därför nå en mycket hög transmission under normala förhållanden. Och, eftersom endast ett litet våglängdsband (kring hotlaservåglängden) blockeras under en laserattack, bibehålls en hög visibilitet för användaren, vilket gör det möjligt att fortsätta med verksamheten. Kirala nematiska vätskekristaller används i komponenter som enkelt kan styras elektriskt. Icke avstämbara och polarisatorberoende skydd, som bygger på vätskekristaller, har tidigare tagits fram. De har dock haft relativt låg transmission även under normala förhållanden<sup>7</sup>.

Det ultrasnabba skyddet bygger på vätskekristaller som dopas med ledande/halvledande nanotuber. I det här fallet styrs ljusets polarisation av nanotuberna. Nanotuber kan med hjälp av en vätskekristallmatris, som styrs elektriskt, orienteras att polarisera infallande ljus och man får en styrbar polarisator<sup>8</sup>. Ett skydd kan därför byggas med 2 stycken korsade styrbara polarisatorer. I normaltillståndet tranmitteras allt ljus men när polarisatorerna aktiveras, polariseras ljuset av den första polarisatorn och om den andra polarisatorn är aktiv och vinklat relativt den första, dämpas transmissionen eftersom ljuset har fel polarisation för att transmittas. Snabbheten och polarisationseffekten för en sådan komponent kommer att bero av längden på nanotuberna och deras ledande förmåga samt vätskekristallens egenskaper.

I våra testupställningar för styrda skydd har vi möjlighet att mäta:

- Omslagshastigheten från transmittande till absorberande/reflekterande tillstånd
- Dämpning, minst OD 6 (dvs. minst 0.0001 % transmission)
- Spektral transmission inklusive fotopisk transmission
- Vinkelberoende; skyddets transmittans beroende av ljusets infallsvinkel
- Skadenivå enligt standard

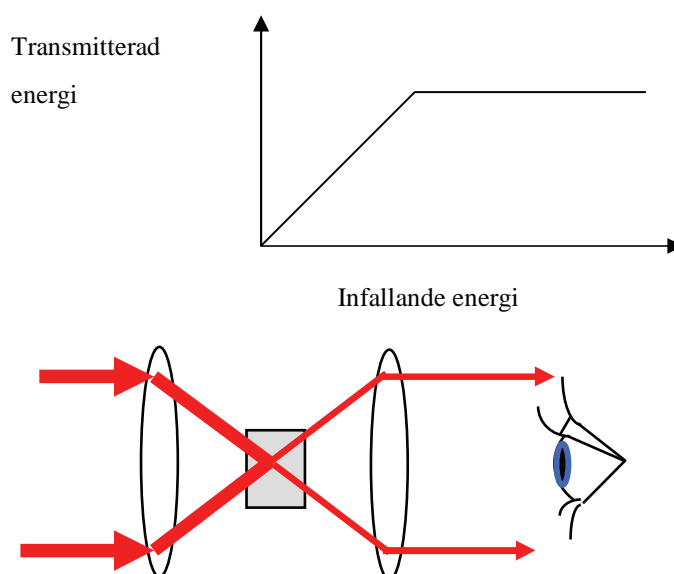
Till vår hjälp finns lasrar, detektorer och spektrometrar, med möjlighet att göra mätningar inom Vis-MWIR.

<sup>7</sup> H. Eliasson, m. fl., ”Laserskydd med Vätskekristallkomponenter”, FOA-R-00-01537-612-SE, Linköping, 2000.

<sup>8</sup> K-J. Wu m.fl., “CdS nanorods embedded in liquid crystal cells for smart optoelectronic devices”, Nanoletters 7, 1908, 2007.

## 2 Testuppställningar för utvärdering av smarta självaktiverande laserskydd

Principen för en optisk begränsare (självaktiverande skydd) är att all inkommande optisk strålning transmittteras på ett optiskt icke-linjärt sätt (se Figur 5). Om det finns en tillräckligt stark strålningskälla i scenen reagerar begränsaren genom att förändra sina optiska egenskaper där strålningen fokuseras. Den optiska absorptionen kan då öka. Strålarnas riktning och divergens kan också påverkas så att den transmitterade strålningen inte längre kan fokuseras på en liten yta på detektorn (eller näthinnan). Resultatet av dessa fenomen är att energi-/effekttheten begränsas så att efterföljande sensorer eller ögon skyddas från skada.



Figur 5. Överst visas en schematisk skiss över sambandet mellan infallande energi och transmitterad energi i en optisk begränsare. Under detta ges en principbild av begränsarens uppbyggnad. En optiskt icke-linjär komponent placeras i ett mellanfokus. Vid intensiv belysning ändrar komponenten sina optiska egenskaper och skyddar ögat.

För att bekräfta en testkomponents begränsande egenskaper är det väsentligt att kunna mäta dessa egenskaper. Under 1990-talet växte det fram en internationell metod för mer standardiserade materialtester (NATO-standard). Genom att placera komponenten i en standardiserad testuppställning och utsätta den för standardiserade laserpulser kan man snabbt och enkelt värdera om komponenten har potential för användning i optiska begränsare. Vi har byggt upp en testuppställning enligt denna standard i laboratoriet<sup>9</sup>. Testuppställningen har använts under flera år för att jämföra olika materials begränsningspotential. I denna rapport beskrivs hur denna uppställning kan förbättras för att möjliggöra effektivare mätningar och utgöra bas för liknade mätningar.

Vid utformning och inköp av laserskadeskydd i olika tillämpningar har köparen specificerade krav på exempelvis högsta tillåtna transmitterade pulsenergies och på skadetrösklar för

<sup>9</sup> Sören Svensson, Bengt Ericson, Cesar Lopes och Anders Eriksson, *Testuppställning för material och komponenter till skydd mot laser*. Startrapport. FOA-R--99-01326-612--SE, december 1999.

begränsaren. Att kontrollera om sådana specifikationer uppfylls kan bli en viktig uppgift. Denna uppgift är emellertid mer komplicerad eftersom exempelvis atmosfärsturbulens och optikens utformning i varje enskilt fall kommer att påverka begränsarens prestanda. I de fallen är det väsentligt att kunna prova skyddet i den optik som det konstruerats för. Det krävs alltså att testuppställningen ska kunna hantera olika optikpaket.

Testuppställningarna ska klara att hantera antingen att det är förhållanden för ett öga eller en kamera/video som avses.

Fallet med en kamera/video exemplifieras med att det är videokanalen i siktet till robot 90 som är skyddsobjektet. Detta skyddsobjekt valdes för att optiken producerar ett tämligen plant bildfält. Detta underlättar konstruktionen av begränsaren. Begränsaren kan dels ses som ett tillsatsskydd i ett befintligt kamerasystem, dels användas som ett test av hur ett skydd för ögon skulle kunna utformas i ett sikte eller en kikare om skydd mot laser varit med i optikens specifikation från början.

Specifikationen för den optiska begränsaren kan innehålla:

1. Maximalt tillåten transmitterad pulsenergi/effekt i laserpulserna.
2. Krav på vilka pulsparametrar som begränsaren tål utan att släppa genom mer energi än specificerat under punkt 1.
3. Våglängdsområde för nämnda specifikationer 1 och 2.
4. Skadetröskel – vad som är märkbart för operatören.
5. Transmission (fotopisk eller med annan viktning).
6. Våglängdsberoende transmission.

För kontroll av specifikation 1–4 är det nödvändigt med en laseruppställning. För specifikation 5–6 behövs en spektrometer.

En begränsare aktiveras av effekt-/energitätheten i den fokuserade laserstrålen. Det är därför inte möjligt att säkert mäta/verifiera skyddsegenskaper utan att använda lasrar. För att verifiera att skyddet är verksamt inom ett spektralområde får vi tillämpa stickprov med ett antal laservåglängder inom det aktuella skyddade spektralområdet. Det finns inga standardiserade mätprocesser som stöd för verifiering av en begränsares funktion. Vi får därför förlita oss på gott omdöme när det gäller hur tätt vi behöver lägga stickprovsvåglängderna och hur vi mäter skador på begränsaren.

Beskrivningen av begränsartestuppställningen nedan har sin grund i NATO-testuppställningen som nämndes på föregående sida. Uppställningen har vidareutvecklats för att ge effektivare mätprocesser.

## 2.1 Beskrivning av testuppställningar

Den tekniska beskrivningen delas upp i fyra delar. Först beskrivs testuppställningens pulsenergi reglering. Sedan följer strålkvalitetsfiltreringen. Strålen leds därpå till en strålvidgare för att täcka den testade optikens inapertur. Den testade optiken kan behöva förses med tillsatsoptik för att passa in mot den standardiserade mottagaroptiken och transmissionssensorn. Slutligen beskrivs mottagaroptik och transmissionssensor. I bilaga A lämnar vi dessutom en översiktlig bruksanvisning för mätning med uppställningen.

Rapporten beskriver testuppställningar som grundas på och uppfyller kraven för en NATO-testuppställning. Olika optiska system skiljer sig från varandra i fråga om inaperturens storlek. För att hantera detta effektivt bygger vi upp två olika testuppställningar. I avsnitt 2.1.3 (sid. 17) klargörs skillnaderna mellan de två uppställningarna för mätningar på olika stora sensorobjektiv.

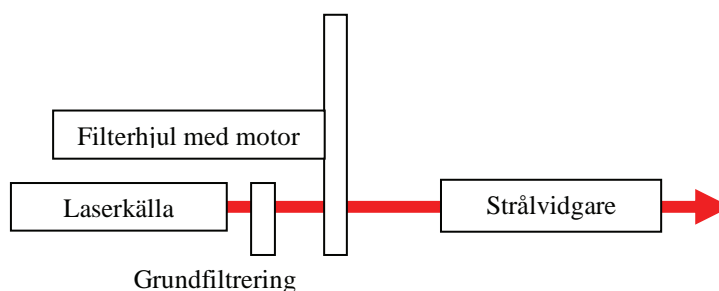


Uppställningen för mätning på mindre sensorobjektiv överensstämmer i allt väsentligt med den standardiserade f/5-uppställningen. Men tonvikten ligger nu på testuppställningen för större objektiv där f-tal 2,65 och 3,7 nu är aktuellt. Testuppställningen med f-tal 3,7, motsvarande ett testsikte används idag. Denna uppställning är under ombyggnad och ska användas för mätning på ett verkligt sikte från robot 90-systemet.

### 2.1.1 Pulsenergireglering

Mätningen kräver att den inkommande laserstrålen kan varieras med avseende på pulsenergi. Mekanismen för detta kan vara manuella filterbyten eller filterhjul eller polarisationspåverkande komponenter. Erfarenheterna från tidigare mätningar gör att vi avstår från polarisationsvridande system: De har visat sig påverka strålen så att riktning eller spatialfiltrering förändrats vid förändring av pulsenergin. För att nå ett automatiserat och snabbt mätförfarande räcker det förmodligen med ett filterhjul för att nå ett tillräckligt stort dynamiskt energiområde. Filterhjulsbaserade mätningar ger dessutom ett betydligt snabbare mätförlopp än manuella filterbyten. Figur 6 visar hur configurationen kan se ut. Om filterhjulet har 12 filterlägen så kan strålens energi halveras 11 gånger och mätdynamiken blir då 2000 gånger vilket torde vara ett tillräckligt stort dynamiskt område.

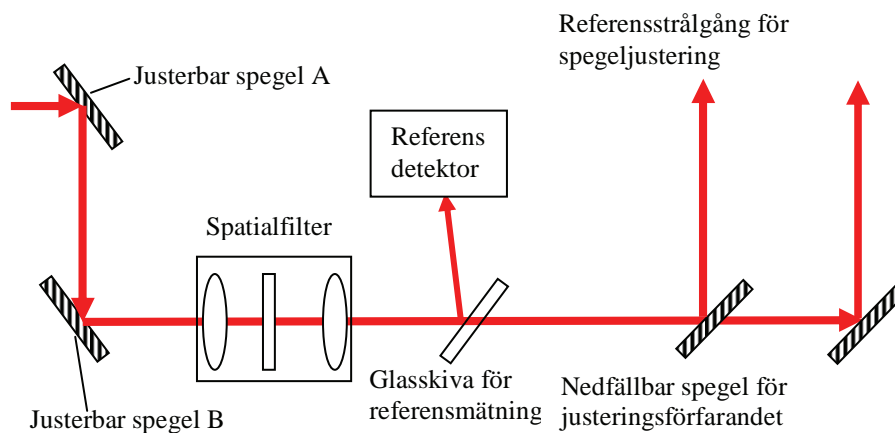
För att stråldiametern i nästa del av strålgången ska fungera behövs sannolikt en liten justerbar strålvidgare efter filterhjulet.



Figur 6. Laserkälla med effekt-/energifiltrering.

### 2.1.2 Strålkvalitetsfiltrering

För att mätningarna ska ge relevanta resultat krävs det att belysningen efterliknar belysningen på stora avstånd. Då är belysningen oberoende av position på sensors ingångsapertur. Det är önskvärt att så långt det är möjligt standardisera belysningsuppställningen framför den testade optiken. Då kan växling av laser eller våglängd utföras så snabbt som möjligt. Den för varje laserkälla/laservåglängd individuella kombinationen av strålkvalitet och uteffekt kommer att ställa olika krav på åtgärder. Optiken kommer att behöva justeras när våglängden ändras. Denna justering bör göras så tidigt som möjligt i strålgången och med så få manuella åtgärder som möjligt.



Figur 7. Här visas en uppställning där de justerbara speglarna A och B används för att korrigera strålens riktning så att den alltid går i samma spår oavsett våglängd.

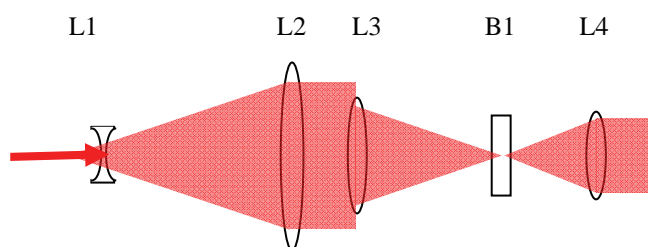
Spatialfiltret är en kritisk komponent. De ingående linserna bör vara av god kvalitet och helst akromater eftersom vi inte vill behöva justera uppställningen efter pinhållet vid våglängdsbyte. Pinhållet bör vara utbytbart utan att öppningens läge förändras. Strålens diameter ( $D$ ) är av storleksordningen 20 mm när den passerat spegel B.

Diffraktionsbegränsningen gör att strålen kan fokuseras ner till ett vinkelområde på  $1,22 \lambda/D$  det vill säga ca 0,03 mrad. För att löpa liten risk att pinhållet skadas av laserstrålen bör linserna i spatialfiltret ha lång brännvidd. Med en fokallängd på 500 mm betyder det att den belysta fläcken blir 15  $\mu\text{m}$  i diameter. Om strålen är smalare behövs ett större pinhål. Lämplig lens kan vara en akromat från Edmund (NT45-270,  $f = 500$  mm,  $\text{Ø} = 40$  mm). Den andra linsen i spatialfiltret är likadan som den första.

Efter spatialfiltret ska en referensmätning av pulsenergin göras. För detta ändamål anbringas en helst kilformad glasskiva som avleder en liten del av strålningen till referensdetektorn. Den första spegeln efter glasskivan fälls upp vid justering så man ser att strålen har samma riktning som tidigare. Vid mätning fälls denna spegel ner och strålen längst till höger är på väg till nästa steg i strålgången: strålvidgaren.

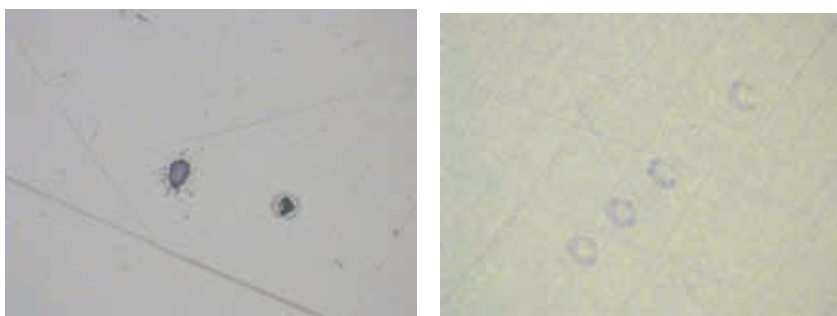
### 2.1.3 Strålvidgare och testad optik med okular

Eftersom vi vill ha möjlighet att exponera begränsaren i de olika testade optikerna för så stora effekter/energier som möjligt krävs det i denna del av strålgången olika optiska komponenter beroende på vilken optik som ska testas. I princip ser dock strålgången alltid ut som i Figur 8. Hushållning med energi innebär här att strålknippen från lins L2 endast ska vara något större än aperturen på den testade optiken (L3). Det billigaste och enklaste sättet att ordna detta är genom att lins L1 byts och flyttas om det behövs vid byte av L3. Det finns emellertid olika klasser av optik som testas - dels sikten och teleobjektiv med ganska stora aperturer och dels bildförstärkarobjektiv och videokameraobjektiv med ganska små aperturer. Det blir därför nödvändigt att ha minst två olika linser (L3) och ett troligen något större antal linser (L4) för att täcka in hela behovsområdet.



Figur 8. Strålvidgare (L1 och L2), testad optik (L3) med laserskyddskomponent (B1) och lins (L4) "okular".

I Figur 9 visas hur den laserskyddskomponenten kan skadas av fokuserad laserstrålning. För att hela tiden säkerställa att laserexponeringen inte påverkas av tidigare "skott" ska en anordning som kan sidoförflytta komponenten mellan varje exponering finnas.



Figur 9. Skador på ytan, 32 respektive 105  $\mu\text{m}$  i diameter.

En aspekt som förtjänar att beröras är att system med låga bländartal fokuserar laserstrålningen på mindre ytor i fokalplanet än system med högre bländartal. Det betyder att det effektiva bländartalet inte får sjunka efter begränsarkomponenten. Om bländartalet sjunker löper vi risken att skyddet inte förmår skydda mot skada.

### 2.1.3.1 NATO-testuppställning F/5 – passar objektiv med mindre apertur

Denna testuppställning har tidigare beskrivits i rapporten FOA-R--99-01326-612--SE. Här ges nya lösningar med akromater för de olika linserna för att minimera behovet av omjustering vid byte av våglängd.

NATO-testuppställningen specificerades ursprungligen med enkla linser. Detta medför att fokuseringsavstånden varierar betänkligt med våglängd. För att minska behovet av optikjustering byter vi ut standardlinserna mot akromatlinser. Som akromatlinse L3 föreslås Edmunds F32-327 som har  $f=100$  mm och  $\text{Ø}=25$  mm. Framför L3 ska en bländare på 20 mm placeras för att bländartalet ska bli 5. Som "akromatokular" (L4) föreslås Edmunds F45-103 som har  $f=40$  mm och  $\text{Ø}=15$  mm. Framför L4 ska lämpligen en bländare på 10 mm placeras för att filtrera bort spridd strålning. För att belysa hela inaperturen på L3 behöver strålen ut från L2 vara omkring 25 mm i diameter. Det betyder att Lins L2 bör ha en diameter på omkring 40 mm och en fokallängd på omkring 400 mm. En lämplig lins kan vara Edmunds F32-927. För att strålen verkligen ska

täcka inaperturen på L3 bör då L1-linsen ha  $f = -150$  mm som exempelvis Edmunds F45-423. Denna variant av L2 kan användas vid test av objektiv med aperturer under 30 mm.

Linsen L3 är det av NATO-testuppställningen simulerade sensorobjektivet. Lins L4 är motsvarande okular. Vid test av andra sensorers och siktens optik ersätter de L3 och eventuella okular ersätter L4. Om okular saknas i sikte/sensor måste en lämplig okularoptik anbringas så att mätningarna kan genomföras.

### 2.1.3.2 Testuppställning för objektiv med större aperturer

Strålen ska vidgas så att den täcker de flesta större objektivs ingångsapertur. Det är då lämpligt att ha en sista lins i strålvidgaren (L2) som har en diameter på upp emot 150 mm. Lämplig akromatlins kan vara 01 LAO 367 ( $f = 1000$  mm,  $\varnothing = 150$  mm) från Melles Griot (lins L2 i Figur 8). För att expandera strålen från 10 mm till 80 mm behövs en negativ akromat med cirka 100 mm brännvidd (exempelvis F45-222 från Edmund;  $f = 100$  mm,  $\varnothing = 25$  mm). (L1 i Figur 8).

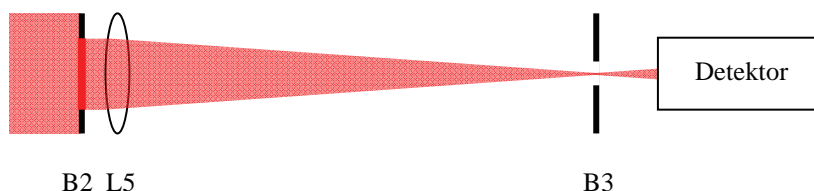
Denna testuppställning kan exempelvis användas både för mätning mot vidikonobjektivet i siktet till RBS90. och till mätning mot det testsikte som användes under Fotonikprogrammet.

Till RBS90 utgör vidikonobjektivet lins L3 med 66 mm aperturdiameter medan lins L4 kan bestå av en lins med cirka 20 mm brännvidd (exempelvis F32-309,  $f = 20$  mm,  $\varnothing = 12,5$  mm).

Den tillbehörslåda som finns till det testsikte som användes under Fotonikprogrammet innehåller både objektiv och okular till testsiktet. Dessa kan anbringas som L3 och L4 i vår testuppställning vilket möjliggör mätningar mot denna optik också.

### 2.1.4 Sensoroptik och transmissionssensor

Den testade optiken placeras centrerat i den utgående expanderade strålen. I Figur 10 visas hur den testade optiken kompletteras med hållare för den begränsande komponenten i fokalplanet samt ett okular (L4) som genererar ett parallellt strålnippe. Detta strålnippe tas omhand av uppställningen beskriven i figuren nedan. Bländare B2 har 7 mm diameter vilket motsvarar ögats pupillstorlek. Lins L5 har brännvidd 1 m och ska fokusera strålningen på en så stor yta att strålen blir lätt att synfältsfiltrera utan risk att synfältsbländaren (B3) skadas. En lämplig lins är Melles-Griot 01 LAO 366. L5 har en ingångsapertur på 7 mm eftersom den ska efterlikna ögat. Diffractionen leder till att laserfläckens storlek vid bländare B3 är av storleksordningen 0,15 mm. B3 har storleken 1,5 mm så att det som passerar bländaren alltid ger en relevant överskattning av den maximala pulsenergin på ögats minsta fokusfläck.



Figur 10. Uppställning för att bedöma skaderisken för ett öga som placeras i strålgången .

Bländare B3 måste kunna flyttas både i höjd och i sida – tvärs strålens utbredningsriktning eftersom alla förändringar som uppstår vid våglängdsbyte knappast kan justeras bort helt och hållet tidigare i strålgången.

Efter bländaren (B3) sitter en detektor som kan mäta transmitterat ljus genom uppställningen. Eftersom L5-brännvidden är lång blir effekten per ytenhet vid B3 avsevärt lägre än i teleskopets mellanfokus, där testkomponenten är placerad. Den relativt låga effekttätheten förhindrar att bländaren skadas vid problem med upplinjeringen. Ett närmevärde på kvoten i effekttäthet (effekttätheten i mellanfokus kontra effekttäthet vid B3 är 500 på grund av ren diffraktion).

Om detektorytan är stor kan detektorn placeras ett stycke från B3 varigenom effekttätheten ytterligare reduceras. Ett avstånd på 60 mm medför rent geometriskt en stråldiameter på 0,48 mm och därmed en reduktion av effekttätheten med ytterligare en faktor  $(0,15/0,48)^2 = 0,1$ . För mätning av höga energier kan även kalibrerade gråfilter anbringas framför detektorn. Avbildningsfelen på grund av sfärisk aberration i L5 är försumbara eftersom bländartalet är mycket högt (125).

## 2.1.5 Uppställningens mätkapacitet.

### 2.1.5.1 Mätkapacitet avseende skadenivå och dynamiskt skyddsomfång

En av de mest avgörande faktorerna för uppställningens mätkapacitet är vilken laserälla som används. Vi har tillgång till en blixtlampspumpad färgämneslaser med en pulslängd mellan 1 och 2  $\mu$ s. Därutöver har vi Nd:YAG-lasrar med pulslängder nära 5 ns vilka är försedda med frekvensdubblare/-tripplare och OPO-system.

Färgämneslasern ger maximalt upp emot en Joule vid den gynnsammaste våglängden och vid andra våglängder kan pulsenergin vara betydligt lägre. Strålprofilen är ringformad och kräver hårdhänt spatialfiltrering för att ge lämplig strålkvalitet.

Nd:YAG-lasrar med frekvensdubblare ger högklassig strålprofil och pulsenergi på 100-tals mJ vid 532 nm. OPO-systemen ger däremot sämre strålprofiler och betydligt lägre pulsenergi.

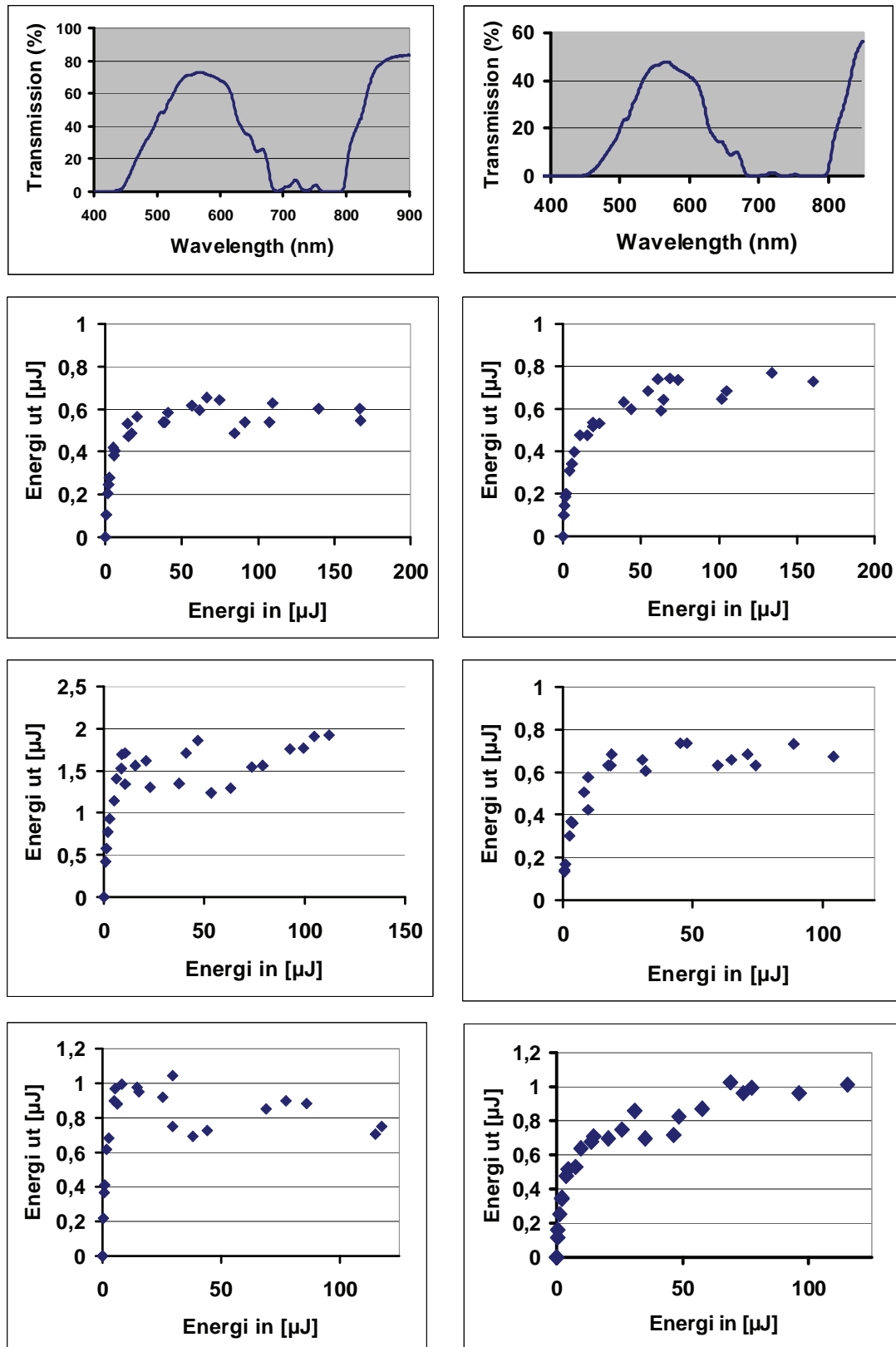
Mätkapaciteten vid 532 nm för 5 ns pulslängder är mycket god. Vi kan kontrollera både skadenivåer och dynamiska skyddsomfång i de flesta tänkbara sammanhang. I den allra största delen av det synliga våglängdsområdet ger OPO-utrustningen tillräcklig energi och strålkvalité för att säkerställa att begränsarna skyddsfunktion och skadetröskel.

### 2.1.5.2 Mätkapacitet avseende spektral transmission vid låga intensiteter

Den Cary-spektrometer vi förfogar över har tillräcklig kapacitet för att mäta den spektrala grundtransmissionen genom en optisk begränsare. Denna mätning ligger sedan till grund för beräkning av fotopisk transmission och färgbalans.

### 2.1.5.3 Exempel på mätningar

En testuppställning för objektiv med stor apertur och med ett f-tal på 3.7, har givit mätdata enligt figuren nedan. Där kan vi se både linjär transmission och optisk begränsning vid tre våglängder för två olika optiskt begränsande filter.



Figur 11. Vänster kolumn visar data för filter 1 (tjocklek 1,5 mm, fotopisk transmission 64 %) medan höger kolumn visar data för filter 2 (tjocklek 1,5 mm, fotopisk transmission 40 %).

### 3 Testuppställning för utvärdering av statiska laserskydd och avancerade styrda laserskydd

En av de utvecklade testuppställningarna är avsedd för att utvärdera statiska laserskydd och avancerade styrda laserskydd.

Statiska laserskydd är en enkel form av skydd som dämpar inkommande laserstrålning linjärt i ett visst våglängdsintervall (se avsnitt 1.2.1 sid. 11). Statiska skydd används på t.ex. laserlaboratorier, i industrin och vid kosmetisk behandling. De finns som t.ex. laserskyddsglasögon och skärmar. Dämpningen åstadkoms genom att laserstrålningen reflekteras bort från skyddet eller absorberas av det. Dämpningen sker i ett visst våglängdsintervall som kan vara smalt för att ge skydd mot en specifik laser eller också brett för att skydda mot olika lasrar. Statiska skydd är därför ofta färgade och användaren kan inte utnyttja hela det synliga ljusspektrat fullt ut. Eftersom dämpningen är fix och alltid närvarande måste ett brett skydd vägas mot synbegränsningar redan vid tillverkningen.

Med avancerade styrda laserskydd menar vi skydd där dämpningen aktivt kan varieras i ett våglängdsintervall. Våglängdsintervallet, som kan vara smalt eller brett, är dock fixerat från början. Dämpningen åstadkommes, precis som i fallet med statiska skydd, genom att inkommande laserstrålning antingen reflekteras bort från skyddet eller absorberas i det. Fördelen med ett aktivt skydd är att det i normalfallet är helt genomskinligt för hela det synliga spektret, eller endast har en svag färgning. Då laserstrålen detekteras aktiveras dämpningen och det våglängdsområde där lasern ligger dämpas. Stora forskningsresurser läggs idag på den här typen av skydd runt om i världen hos olika försvarsorganisationer.

#### 3.1 Beskrivning av testuppställningen

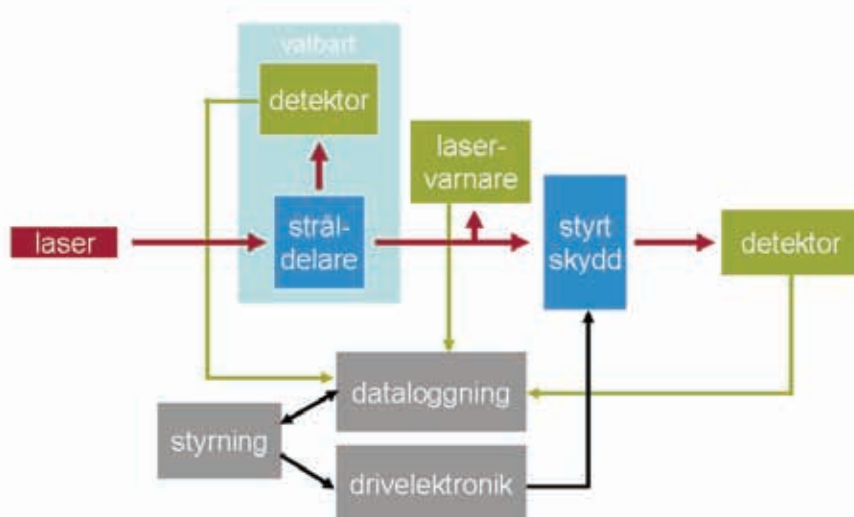
Våglängdsområdet där de statiska eller styrda laserskydden ska verka kan skilja sig från skydd till skydd. För att kunna testa skydden behövs alltså en strålkälla som skickar ut strålning med olika våglängder. I testuppställningen finns därför möjlighet att använda en avstämbar laser eller lasrar med bestämd våglängd. Vi utför också tester med spektrometrar för att öka säkerheten i mätningarna. Spektrometern kan visserligen inte mäta upp dämpningen för olika våglängder tillräckligt noggrant, men i kombination med noggranna stickprovsmätningar med laser kan skyddets funktion bedömas för alla relevanta våglängder.

Laserstrålen passerar ett antal optiska komponenter på vägen till laserskyddet och vidare till detektorn. Dessa redovisas i detalj i bilaga B. Det här avsnittet däremot beskriver testuppställningen i stort, så som det visas i Figur 12 nedan.

Laserstrålen vidgas för att få en storlek kring 5 mm och den kan polariseras linjärt i valfri riktning. På vägen mot skyddet länkas en mindre del av laserstrålningen av och mäts upp som referens.

Det statiska eller styrda skyddet monteras i en särskild hållare. Skyddet sitter i hållaren så att hela dess aktiva area är tillgänglig för laserstrålen. Hållaren kan dessutom roteras så att strålen träffar skyddet från olika vinklar. Den strålning som passerar genom laserskyddet mäts sedan upp med en provdetektor.

Testuppställningen uppfyller specifikationen MIL-DTL-62422C(TA), se avsnitt 1.1.2 och Figur 1 (sid. 8).



Figur 12. Principskiss av testupställningen för styrda laserskydd.

Testupställningen innehåller extra utrustning för en ordentlig utvärdering av styrda laserskydd, vilka är betydligt mera komplicerade än statiska skydd. Styrda laserskydd drivs av en spänning och har ett omslagsförlopp då de går från öppet till stängt läge.

Styrspänningen till laserskyddet ges ut av en multifunktions AD/DA-omvandlare och skalas upp i en snabb förstärkare. Multifunktionsenheten läser även av spänningarna från provdetektorn och referensdetektorn. Multifunktionsenheten är kopplad via en USB-anslutning till en dator och styrs av ett LabWindows-program från datorn.

LabWindows-programmet bestämmer vilken styrspänning som multifunktionsenheten ska lägga ut och läser även av spänningsvärdena från de optiska detektorerna. Inledningsvis får LabWindows-programmet instruktioner av operatören vad som ska hända när det får triggsignal från någon av de optiska detektorerna, vilken styrspänning som ska läggas ut på laserskyddet och hur länge spänningen ska ligga på. En sekvens av instruktioner, maximalt i fem steg, kan ställas in i programmet. Programmet instrueras även vid vilken tidpunkt och i vilken takt som det ska samla in mätvärden från detektorerna och var data ska lagras någonstans.

## 3.2 Test av dämpningsförmågan

En av de viktigaste uppgifterna för testupställningen är att avgöra den faktiska dämpningsförmågan i ett statiskt eller styrt laserskydd. Dämpningen varierar beroende på skyddets konstruktion och önskad skyddsnivå. Kraftfulla skydd förväntas ha en dämpning på OD5 (det vill säga  $10^5$  eller 100 000 gånger) och testupställningen är tänkt att kunna mäta till minst OD6.

En komplikation är att det dynamiska området för optiska detektorer oftast är mindre, speciellt som specifikationen MIL-DTL-62422C(AT) (avsnitt 1.1.2 sid. 8) föreskriver ett signal-till-brusförhållande på minst 10. För att ge detektorerna ett större dynamiskt område finns därför möjlighet att montera ett dämpningsfilter med väl känd dämpning efter laserskyddet och före den optiska detektorn. Dämpningsfiltret sitter i strålgången när laserskyddet är i öppet läge och dämpar höga energier till nivåer som passar detektorn. När laserskyddet sedan har aktiverats, tas dämpningsfiltret bort och den lilla rest av laserstrålningen som klarar att passera skyddet mäts direkt på detektorn.



Vid mätningens början kalibreras provdetektorn och referensdetektorn mot varandra genom att jämföra uppmätt effekt från lasern. Detektorernas känslighet för olika våglängder är känd. Uppmätt effekt på provdetektorn relateras sedan till den optiska dämpningen genom att ett kalibrerat filter med dämpning mellan OD3 och OD4 placeras i hållaren för skyddet, enligt nyss nämnda specifikation i avsnitt 1.1.2 (sid. 8).

### 3.3 Anpassning av dämpning till rätt våglängdsintervall

Laserskydd som kan styras till en viss våglängd och dämpa bara den är ovanliga i dag och befinner sig i huvudsak på utvecklingsstadiet. De flesta av dagens skydd dämpar i stället strålningen inom ett förutbestämt våglängdsintervall, som kan vara smalare eller bredare.

Skydden aktiveras som nämnts av en styrsignal och dämpar därvid infallande laserstrålning i hela det berörda våglängdsintervallet. Det går alltså inte att skifta våglängdsintervall med hjälp av styrsignalen.

För att få skydd i olika våglängdsintervall är därför den enklaste lösningen i dagsläget att placera ett antal laserskydd efter varandra i strålgången, där vart och ett av skydden dämpar i olika våglängdsintervall. Om våglängden på laserstrålningen är känd, så kan rätt skydd aktiveras medan övriga står kvar i öppet läge. Den nuvarande testuppställningen har inte denna möjlighet utan kan enbart aktivera ett skydd, oavsett laserstrålningens våglängd.

I en vidareutveckling av testuppställningen finns en detektor monterad som kan bestämma laserstrålningens våglängd och olika styrsignaler kan styra olika laserskydd. Detektorn är antingen en kommersiell spektrometer eller en enklare lösning såsom en matris med detektorelement med olika våglängdsfilter framför.

### 3.4 Test av olika infallsvinklar och polarisationer

Det statiska eller styrbara laserskyddet sätts i en hållare som kan rotera kring sin axel. På det viset kan infallsvinklar från 0° till  $\pm 90^\circ$  testas. Dessutom kan planet för laserstrålningens polarisation väljas fritt. Detta innebär sammantaget att olika kombinationer av infallsvinklar och polarisation kan testas, vilket är viktigt eftersom laserskyddets funktion kan variera stort beroende på dessa faktorer. Därmed uppfyller testuppställningen även standarden EN 207:1998 (avsnitt 1.1.1 sid. 7).

### 3.5 Test av omslagstid och exponeringstid

LabWindows-programmet kan aktivera laserskyddet antingen när laserstrålningen går över en viss nivå, eller efter manuell order (se vidare nästa avsnitt 3.6).

Omslagsförloppet när laserskyddet går från öppet till stängt läge kan mätas med oscilloskop eller multifunktionsenheten. När två kanaler på oscilloskopet används är samplingsfrekvensen 5 GS/s, det vill säga 200 ps mellan två mätpunkter. Omslagsförlopp i storleksordningen 5 ns kan alltså studeras tämligen väl.

Med multifunktionsenheten är samplingshastigheten 10 kHz, motsvarande 100  $\mu$ s mellan varje mätpunkt. Styrkan hos denna enhet är att långa mätserier (flera minuter) kan sparas.

Omslagstiden kan mätas upp oberoende av vilken definition som används (jämför avsnitt 1.1.3 sid. 9).

En annan aspekt när det gäller tid är att skyddet ska tåla att exponeras för laserstrålningen under 10 s enligt den standard som finns (EN 207:1998, se avsnitt 1.1.1 sid. 7).

## 3.6 Aktivering med laservarnare eller manuell aktivering

De laservarnare som används i dag är mestadels avsedda för att upptäcka pulssade lasrar med våglängder i IR-området. Det finns även varnare som går ned i det synliga, mot 400 nm, men även dessa är anpassade för pulssade lasrar. Dagens laservarnare är därför inte direkt användbara för att upptäcka den form av bländning med synliga våglängder från kontinuerliga lasrar som våra laserskydd även ska kunna klara. Det finns därför ett behov att utveckla nya typer av laservarnare.

Å andra sidan kan samma typ av detektor som ska skyddas användas för att upptäcka bländande laserstrålning. Antingen kan den detektor som ska skyddas själv slå larm när strålningsintensiteten blir för hög, eller så kan en extra detektor av liknande typ sättas i strålgången och varna för höga nivåer.

Testuppställningen mäter signalerna både från den detektor som ska skyddas och från en extra varnardetektor. En strålavskiljare placeras före laserskyddet för att länka av cirka 4 % av strålningen och rikta den mot varnardetektorn. Båda detektorerna kan alltså användas för att mäta höga strålningsnivåer.

En nackdel med att använda detektorn som ska skyddas som varnare är att när laserskyddet har aktiverats kommer i princip inte längre något av strålningen att träffa detektorn och det blir problematiskt att avgöra om bländningen fortfarande ligger kvar. I de flesta fall med icke-ideala laserskydd kommer ändå en liten del av den bländande strålningen att passera genom skyddet och träffa detektorn och det är tänkbart att denna lilla del kan mätas upp och användas för att bedöma om bländningen finns kvar. En detektor som är placerad innan laserskyddet mäter däremot förstås hela tiden den strålning som faller in mot skyddet.

LabWindows-programmet registrerar signalerna från de båda detektorerna. Signalen kan användas för att aktivera laserskyddet. Om signalen mäts analogt kan skyddet aktiveras när en viss nivå överskrids. Men om signalen varierar inom vissa gränser är det bättre att mäta den via en digitalgång. Då kan aktiveringen av laserskyddet ske snabbare.

Laserskyddet kan även aktiveras oberoende av vad detektorerna mäter upp. Aktiveringen sker då antingen manuellt genom att operatören trycker på en knapp eller automatiskt efter en viss tid som ställs in i LabWindows-programmet.

Aktivering med hjälp av en varnande detektor är det som mest liknar en verklig tillämpning och kan med fördel användas när testuppställningen ska visas upp för laserskyddsintressenter. Den manuella aktiveringen är lämplig att använda när laserstrålningen håller en konstant nivå och används därför i de flesta fall vid kontrollerade mätningar av laserskyddets prestanda.

## 3.7 Uppställningens mätkapacitet

### 3.7.1 Mätkapacitet avseende skadenivå och dynamisk skyddsomfång

Precis som diskuteras tidigare (se avsnitt 2.1.5.1 sid. 20) är en av de mest avgörande faktorer vilken laserälla som används. De lasrar som används i testuppställningen arbetar med kontinuerlig effekt och relativt måttliga effekter, under 15 mW. Enligt den standard som vi följer (EN 207:1998, se avsnitt 1.1.1 sidan 7) kan vi som mest mäta en optisk dämpning och skadenivå på OD3 med denna effekt. För att mäta en optisk dämpning och framförallt skadenivå enligt standarden på OD6 krävs kraftfullare cv-lasrar med en uteffekt på minst 3 W. Sådana lasrar för specifika våglängder kan införskaffas från de vanligaste optikföretagen och är tekniskt möjligt att integrera i denna testuppställning.

Dessutom finns, som diskuterades i avsnitt 2.1.5.1, tillgång till en Nd:YAG-laser med OPO-utrustning. Med denna pulslaser kan vi mäta skadenivå och dynamisk skyddsomfång på minst

OD6 inom the synliga våglängdsområdet upp till när-NIR. Dock är vi i nuvarande laseruppsättning begränsad till mätningar över 350 nm.

Den befintliga provdetektorn är känslig i våglängdsintervallet 320–1100 nm och täcker alltså det synliga området, men inte hela vägen upp till 1400 nm. Den kan emellertid bytas mot en annan tillgänglig detektor, vilken är känslig i intervallet 800–1750 nm. .

### **3.7.2 Mätkapacitet avseende omslagstider**

Detektorerna i den nuvarande uppställningen har en begränsning i bandbredd på 10 MHz. Det innebär att omslagsförlopp snabbare än 1  $\mu$ s kan vara svåra att studera, även om insamlingsutrustningen (speciellt oscilloskop, se avsnitt 3.5 sid. 24) är snabbare än så. Dock är detektorerna under uppgradering till detektorer med stigtider runt 20 ns som gör att vi kan studera förlopp i denna tidsdomän inom snar framtid.

## 4 Slutsatser

Laboratorietester är det första steget i verifieringen av en komponents/utrustnings prestanda. En testuppställning ska följa framtagna standarder så långt det är möjligt. Vi har därför gått igenom relevanta standarder under uppbyggnad/modifiering av våra testuppställningar för laserskydd, med syftet att göra mätningarna säkrare och enklare.

Laboratorietestuppställningar för utvärdering av laserskydd finns idag främst hos olika försvarsforskningsorganisationer runt om i världen, Den mest spridda och kända testuppställningen är f/5 (NATO-testuppställning) för utvärdering av självaktiverande laserskydd. Vi har, med utgångspunkt, från f/5 testuppställningen, förbättrat och utvecklat metoder för att klara tester på olika militära system med inbyggt självaktiverande laserskydd. Förbättringarna innebär nya och effektivare versioner av våra testuppställningar för både NATO-standardiserad mätningar och mätningar på olika militära optiksystem.

Vi har också vidareutvecklat testuppställningen för utvärdering av styrda och statiska skydd. Denna testuppställning kan värdera både statiska laserskydd och avancerade styrda laserskydd. Den optiska dämpningen kan bestämmas vid olika infallsvinklar och olika polarisation.

Vi kan tillförlitligt mäta omslagsförlopp för styrda laserskydd som är i storleksordningen 5 nanosekunder. Möjligheten finns också att aktivera ett styrt laserskydd med en varnardektorer för att efterlikna en verklig användarsituation.

Den genomgång av standarder som berör styrda och statiska laserskydd har visat att det finns en europeisk standard EN 207:1998, som också är ratificerad av det Svenska standardiseringsorganet Swedish Standards Institute (SIS), och en amerikansk militär specifikation MIL-DTL-62422C(AT) utgiven av US Department of Defense som är relevanta. Den mätuppställning för värdering av styrda och statiska skydd, som har tagits fram på FOI, följer EN 207:1998 men även MIL-DTL-62422C(AT) då de är kompatibla med varandra. Även i andra delar görs mätningar i enlighet med dessa dokument. Dock har FOI med denna genomgång också lyft fram några frågetecken kring hur relevanta dessa standarder är för det militära området. Ett sådant frågetecken är hur relevant det är med så höga värden på irradiansen eller energitätheten som standarden föreskriver. Genomgången visade också på bristen av en relevant standard att mäta omslagstider för styrda laserskydd.

Med dessa testuppställningar är det möjligt att analysera/utvärdera de olika typer av laserskyddsfiler under utveckling och de statiska filtren som finns kommersiellt tillgängliga. I mätningarna konstaterar vi därmed att FOI följer rådande standarder på området för laserskyddsmätningar. Testuppställningarna kan, förutom att användas för att testa de filter som tas fram inom projektet, också användas för att bistå andra inom Försvarmakten eller civila intressenter med mätningar/verifieringar av laserskyddsfiler.

Utvecklad styrelektronik och styrprogram, till de styrda skydden, kommer att användas vid fälttester. Dessa kan senare vidareutvecklas, dvs. anpassas till enskilda skyddsfiler för att förbättra snabbhet, vikt och för säkrare drift.

## Bilaga A – Bruksanvisning för begränsarmätningar

Innan mätprocessen startas har testuppställningen fixerats från spatialfiltret till detektorn (Figur 7 sid. 17 och Figur 8 sid. 18). Komponenterna i uppställningen har linjerats och man har säkerställt att strålkvaliteten är god och att det är en uniform belysning över hela ingångsaperturen på den testade optiken.

Mätprocessen sker enligt följande schema:

1. Val av våglängd: Antingen används våglängden 532 nm direkt efter frekvensdubblaren, eller så väljs en våglängd från OPO:n genom injustering av denna.
2. Kontroll av att stråldiametern är korrekt före spatialfiltret. Om strålen är för liten kan den vidgas med en strålvidgare eller en uppställning med två linser.
3. Justering av speglarna A och B så att strålen faller in rakt mot spatialfiltret. (Se Figur 7 sid. 17) Första linsen i spatialfiltret justeras i längsled så att strålen fokuseras i pinhållet. (Transmitterad effekt genom uppställningen maximeras.)
4. Kontroll av att strålriktningen inte förändrats genom att tillfälligt fälla upp den nedfällbara spegeln (Figur 5 sid. 14) och se att strålen går samma väg som tidigare.
5. Kontrollmät strålprofil och homogen aperturbelysning.
6. Korrigera grunddämpning till lämplig maximal pulsenergi med hjälp av filterhjulet i belysningsanordningen (Figur 6 sid. 16).
7. Referensdetektorn kalibreras genom att pulsenergin ökas och mätvärden från referensdetektorn och den testade optiken sparas.
8. Den begränsande komponenten förs in i strålgången.
9. Pulsenergin varieras från låga till höga värden och detekterade värden på referensdetektorn och den testade optiken samlas in.

## Bilaga B – Optiska komponenter för testuppställningen för statiska laserskydd och styrda laserskydd

### Utbytbara strålkällor

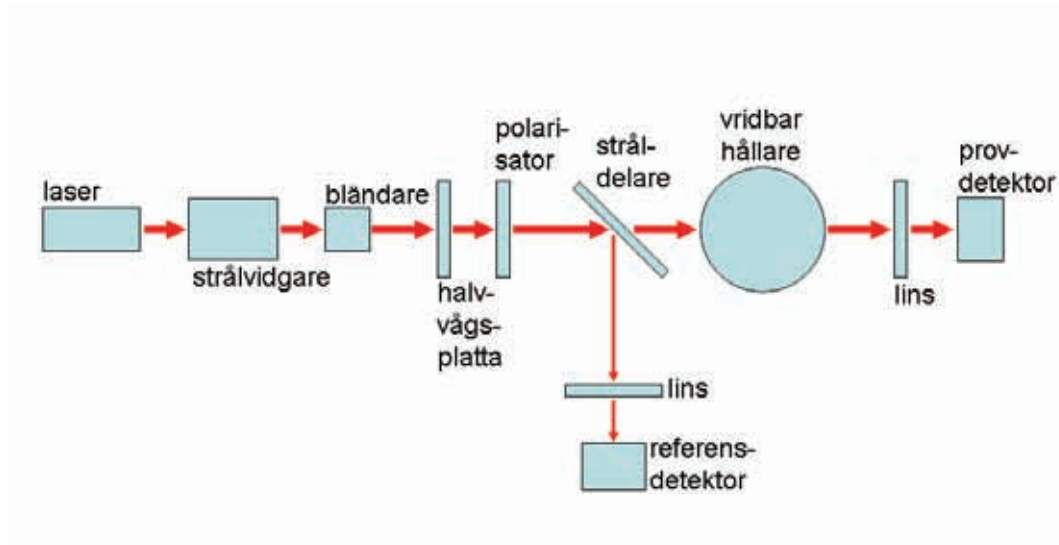
1. Grön laser  
(Melles Griot 05-LGR-151-230, kontinuerlig laser, 5 mW, 543,5 nm.)
2. Orange laser  
(Uniphase 1879, kontinuerlig laser, 4mW, 612 nm.)
3. Röd laser  
(Melles Griot 05-LHR-151, kontinuerlig HeNe-laser, 15 mW, 632,8 nm.)
4. Laser med OPO (Quantel A06 och Opotek Rainbow.)

### Komponenter

5. Strålvigare, Melles Griot, 6 gånger (gör strålen bredare)
6. Bländare (ger rätt storlek på strålen)
7. Halvvågspatta (vridning av laserns polarisationsplan)
8. Polarisator, (fixering av laserns polarisationsplan)
9. Avlänkingsplatta (länkar av en del av strålen mot referensdetektorn)
10. Samlingslins, akromatisk (insamling av strålen mot referensdetektorn)
11. Vridbar hållare (Melles Griot, upplösning 5')
12. Kalibrerat absorptionsfilter
13. Samlingslins, akromatisk (insamling av strålen mot provdetektorn)

### Detektorer

14. Provdetektor (Thorlabs PDA55)
15. Referensdetektor (New Focus 2033)



Figur 13. Komponenter som används i testupställningen för statistiska laserskydd och styrda laserskydd.