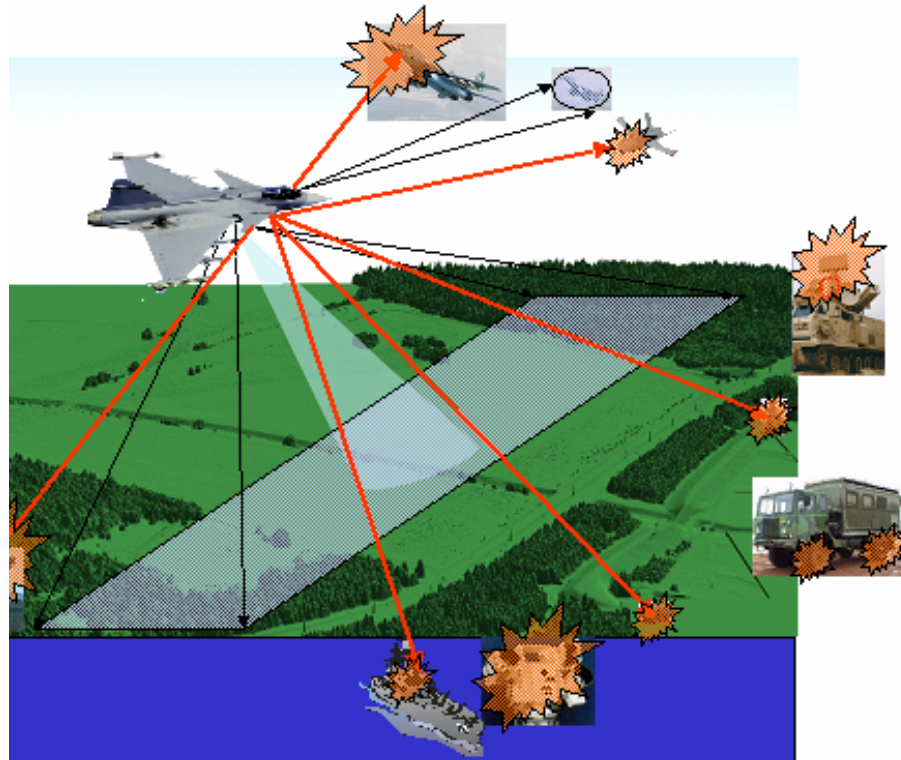


Ove Steinvall, Lars Sjöqvist

Kulor av ljus – Översikt av tillämpningar och teknik för laservapen



TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

Sensorteknik

Box 1165

581 11 Linköping

FOI-R--0920--SE

Juni 2003

ISSN 1650-1942

Underlagsrapport

Ove Steinvall, Lars Sjöqvist

Kulor av ljus – Översikt av tillämpningar och teknik för laservapen

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Sensorteknik Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--0920--SE	Klassificering Underlagsrapport
	Forskningsområde 6. Telekrig	
	Månad, år Juni 2003	Projektnummer E3020
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 61 Telekrigföring med EM-vapen och skydd	
Författare/redaktör Ove Steinvall Lars Sjöqvist	Projektledare Ove Steinvall	
	Godkänd av Svante Ödman	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Ove Steinvall	
Rapportens titel Kulor av ljus – Översikt av tillämpningar och teknik för laservapen		
Sammanfattning (högst 200 ord) Det råder inte någon tvekan om att laservapen kommer att revolutionera vapen användningen på många sätt i framtiden. Blotta tanken på att man i ett taktiskt scenario på 1 mils avstånd kan träffa och förstöra mål av en fotbolls storlek, samt att man kan göra det i stort sett samtidigt som målet upptäcks och att bekämpningen sker helt tyst och utan sidoverkningar, gör att man inser de revolutionerande egenskaperna med laservapnet. Andra egenskaper som låg kostnad per skott, "djupa magasin" och liten logistik förstärker denna insikt ytterligare. Den senaste utvecklingen pekar på att laservapen kan komma att införas på relativt bred front inom den närmaste 10-20 årsperioden. Plattformar som stridsflygplan, fordon och fartyg är alla aktuella som bärare av laservapen. Rapporten beskriver utvecklingsläget för laservapen med tonvikt på utvecklingen i USA. Dessutom ges en beskrivning av grundläggande fenomen och begränsningar, teknik, simuleringsbehov samt en översikt av andra potentiella tillämpningar för högenergilaser. Laservapenutveckling är förenad med stora kostnader och dess nya förmågor måste värderas i relation till konventionella vapen. Det är därför rimligt att FM följer området och vidmakthåller och utvidgar grundkompetenser för att värdera och bedöma laservapenutvecklingen från aspekterna "hot och möjligheter". Rekommendationer för detta ges i rapporten inkluderande förstärkning av verksamhet inom laserradar och DIRCM området för att på sikt kunna uppgradera dessa till högre energier samt att kunna anvisa lämpliga skydd mot högenergilaser.		
Nyckelord Laservapen, verkanslaser, elektromagnetiska vapen, laserkällor, adaptiv optik, diodpumpade lasrar		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 138 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Sensor Technology P.O. Box 1165 SE-581 11 Linköping	Report number, ISRN FOI-R--1000--SE	Report type Base data report
	Programme Areas 6. Electronic Warfare	
	Month year June 2003	Project no. E3020
	General Research Areas 5. Commissioned Research	
	Subcategories 61 Electronic Warfare including Electromagnetic Weapons and Protection	
Author/s (editor/s) Ove Steinvall Lars Sjöqvist	Project manager Ove Steinvall	
	Approved by Svante Ödman	
	Sponsoring agency	
	Scientifically and technically responsible Ove Steinvall	
Report title (In translation) Bullets of light – Overview of applications and technology for laser weapons		
Abstract (not more than 200 words) There is probably no doubt about the fact that laser weapons will revolutionize the weapon area in many ways. The mere idea that a football sized target can be destroyed at 10 km range the same time it is detected, and the fact that this is happening in silence and with no collateral damage makes one believe that laser weapons have truly revolutionary properties. Other properties include low cost per shot, “deep magazine” and a small logistic footprint which enforces the conclusion. Recent development points towards operational capabilities in a relatively broad way within the next 10-20 years. Platforms such as combat aircraft, fighting vehicles and ships are all relevant as carriers of laser weapons. The report describes the status of laser weapons with emphasis on the development in USA. There are also descriptions of basic phenomena and limitations, technology, modelling and simulation as well as an overview of other potential applications for high energy lasers. Development of laser weapons is costly and their new capabilities must be evaluated in relation to conventional weapons. It is therefore recommended that the Swedish Armed Forces follow this area in order to evaluate both the threat and capability sides of the coin. It is therefore reasonable that we maintain and expand the competence in relevant laser areas such as laser radar and DIRCM to include potential upgrade of these systems to high energy levels and to be able to recommend proper protection for high energy lasers.		
Keywords Laser weapons, electromagnetic weapons, laser sources, diode pumped lasers, adaptive optics		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 138 p.	
	Price acc. to pricelist	

Innehållsförteckning

INNEHÅLLSFÖRTECKNING	4
INLEDNING.....	6
GRUNDLÄGGANDE SYSTEMFUNKTIONER OCH KARAKTERISTIKA	7
TILLÄMPNINGAR FÖR HÖGENERGILASRAR.....	11
STRATEGISKA TILLÄMPNINGAR	11
<i>Flygburet laservapensystem.....</i>	<i>12</i>
<i>Rymdtillämpningar</i>	<i>12</i>
<i>Markbaserat laservapen</i>	<i>13</i>
TAKTISKA TILLÄMPNINGAR.....	15
HÖGENERGILASER I STRIDSFlyGPLAN	16
ARMETILLÄMPNINGAR I NBF.....	22
MARINA TILLÄMPNINGAR.....	25
INTERNATIONELLA OPERATIONER	27
ANDRA TILLÄMPNINGAR FÖR HÖGENERGILASER	28
NYA KONCEPT	32
<i>UV-jonisering av luft.....</i>	<i>32</i>
<i>Icke-dödliga vapen.....</i>	<i>32</i>
TAKTISKA LASERVAPEN-EX. PÅ UTVECKLING UNDER 1970-1995	33
PÅGÅENDE UTVECKLING AV TAKTISKA LASERVAPEN (2001-03)	37
STRATEGISKA LASERVAPEN.	50
TÄNKBAR ANVÄNDNING AV LASERVAPEN I ETT SVENSKT PERSPEKTIV	55
GRUNDLÄGGANDE FENOMEN OCH BEGRÄNSNINGAR.....	66
ATMOSFÄRSUTBREDNING.....	67
<i>Turbulenseffekter</i>	<i>67</i>
<i>Dämpning i atmosfären.....</i>	<i>72</i>
<i>Termisk uppvärmning av atmosfären ("thermal blooming")</i>	<i>74</i>
<i>Molnstatistik.....</i>	<i>77</i>
DETEKTION OCH INRIKTNING	78
<i>Laserpekning.....</i>	<i>80</i>
<i>Följning.....</i>	<i>80</i>
AKTIV/ADAPTIV OPTIK	84
VERKANSEFFEKTER.....	85
<i>Skada i EO-sensorer</i>	<i>86</i>
<i>Strukturskador</i>	<i>88</i>
<i>Ögonsäkerhet.....</i>	<i>89</i>
SKYDD.....	90
SIMULERING AV LASERVAPEN	90
TEKNIKUTVECKLING.....	92
LASERKÄLLOR.....	92
<i>Syre-jodlasern (COIL).....</i>	<i>93</i>
<i>HF/DF laser.....</i>	<i>94</i>
<i>Diodpumpade fastatillståndslasrar ("Diode Pumped Solid State Lasers", DPSSL).....</i>	<i>96</i>
<i>Fiberlaser.....</i>	<i>101</i>
<i>Diodlaseramatiser.....</i>	<i>104</i>
<i>Fri-elektronlaser.....</i>	<i>105</i>

ENERGIFÖRSÖJNING AV HEL.....	109
PEK OCH FÖLJESYSTEM.....	111
AKTIVT/ADAPTIV OPTIK.	112
DISKUSSION OCH SLUTSATSER	113
REFERENSER	116

Appendix

A. Laservapen på taktiskt flygande plattform	120
B. Fordonsburen LV laser	127
C. Fartygsburet laservapen	133

Inledning

År 212 f Kr anföll den romerska krigsherren Marcellus staden Syrakusa med sin flotta. Enligt legenden konstruerade då fysikern Arkimedes en anordning med speglar som kunde fokusera solstrålning på ett av Marcellus skepp som sattes i brand. Syrakusa räddades. Principen är enkel, *brännglaset*, och man kan kalla detta för det första strålvapnet. Lasern möjliggör att man nu kan realisera strålvapen så att de får relevans för dagens moderna stridsfält.



Figur 1. Gårdagens och morgondagens strålvapen (vänster). ABL, "Airborne Laser" som avser att demonstrera nedskjutning av ballistiska missiler (höger).

Lasern som vapen brukar indelas i följande klasser:

Laservapen- Lasersystem med allmändestruktiv verkan på mekaniska strukturer, t.ex. flygplansroppar. Detta kräver höga energier och effekter för att realiseras på km avstånd. Medeleffekter överstiger i regel 100 kW och pulsenergies närmar sig 1000 J. Försvarsmyndigheter i USA definierar högenergilaser (HEL) som en laser med minst 20 kW i medeleffekt och/eller minst 1 kJ i pulsenergi. Dessa nivåer krävs för att ge allmändestruktiv verkan på km avstånd med utnyttjande av en sändaroptik på 0.5-1 meters diameter. Energitätheten i målet bör vara 1-10 kJ/cm².

Antisensorlaser- Lasersystem vars primära syfte är att verka mot optiska sensorer. Om laserstrålningen ligger inom sensorns våglängdsområde och lasern riktas noggrant krävs låga lasereffekter/energier för att åstadkomma verkan t.ex. i form av störning av elektro-optiska sensorer. De numera etablerade DIRCM-systemen ("Directed Infrared Countermeasures") utgör exempel på verkanslasersystem under införande för skydd av plattformar, främst fpl och hkp.

En stor satsning på laservapenutveckling gjordes främst i USA, men även i Europa, under 80-talet. För att förverkliga SDI-initiativet behövdes både rymd- och markbaserade laservapen som skulle skjuta ned interkontinentala robotar. Man utvecklade i USA den imponerande MIRACL ("Mid Infrared Advanced Chemical Laser") en kemisk laser med

2 MW uteffekt under några sekunder i taget. Emellertid är denna typ av laser mycket skrymmande och kräver ett massivt bränslesystem till en funktion som påminner om en raketmotor.

Under åttiotalet var högenergilasrar baserade på laserdiodpumpade fastatillståndslasrar inte påtänkta. Idag kan laserdiodmatriser generera 10 tals kW och diodpumpade lasrar med medeleffekter över 10 kW har utvecklats. Kommersiella fiberlasersystem på 2-5 kW kan köpas för materialbearbetning.

Lasertekniken har nu utvecklats till den punkt att de kan bli aktuella i en mängd tillämpningar inom den närmaste tjugoårsperioden. Det vore emellertid fel att tro att tekniken är helt färdig för exploatering - det behövs fortfarande forskning och utveckling kring laserkällor, strålkontroll, atmosfärsutbredning, vapeneffektanalys och systemanpassning till olika typer av plattformar.

Laser och HPM tillhör båda den elektromagnetiska vapenfamiljen. Verkan av dessa system är olika. HPM stör/förstör elektronik medan laservapen både kan vara störande och framkalla allmändestruktiv verkan på långa avstånd med hög precision (<10 cm) utan större sidoeffekter. En sidoeffekt som måste beaktas laservapen med våglängder inom ögats transmissionsområde (0.4-1.5 μm) är ögonsäkerhet för den strålning som emitteras mot och reflekteras från målet.

HPM och laser konkurrerar inte utan kompletterar varandra. HPM-vapen kommer att generera icke önskvärda effekter på egna system om de används på eller nära egna plattformar och system. Det är därför är lämpligt att låta dessa verka nära fiendens installationer, något som nu sker via UAV-montering. Laservapen kan med fördel monteras på plattformar både för egenskydd och offensiv användning.

Den här rapporten redovisar status för laservapen med allmändestruktiv verkan (som man kan erhålla via öppna källor), belysa tänkbara tillämpningar bl.a. ur svensk synvinkel samt föreslå verksamhetsinriktning avseende för laservapen relevant forskning.

Grundläggande systemfunktioner och karakteristika

Man brukar framhålla flera motiv för och emot laservapen (som även till stora delar gäller för EM-vapen i allmänhet).

Unika fördelar inkluderar:

- *Kulor med ljushastighet-mål kan bekämpas i samma ögonblick som de upptäcks.*
- *Potential till stor eldkraft*
- *Goda möjligheter till multipelmålbekämpning*
- *Stor vinkeltäckning*

- Kan verka mot små snabba manövrerande mål
- Inte så känsligt för elektronisk motverkan
- Låg kostnad per insats ("skott")
- "Mission kill" i stället för konventionell nedkämpning av målet-av stort värde inte minst vid internationella insatser.
- Graderad verkan-låga sidoeffekter.

Nackdelar inkluderar:

- Fri siktlinje till målet krävs
- Väderberoende verkan (så dock även många av de mål som ska bekämpas)
- Det krävs ibland en viss belysningstid
- Verkansverifiering är inte trivial
- Laserskydd kan nedsätta funktionen
- Osäker systemkostnad eftersom tekniken till stora delar är ny och oprövad.

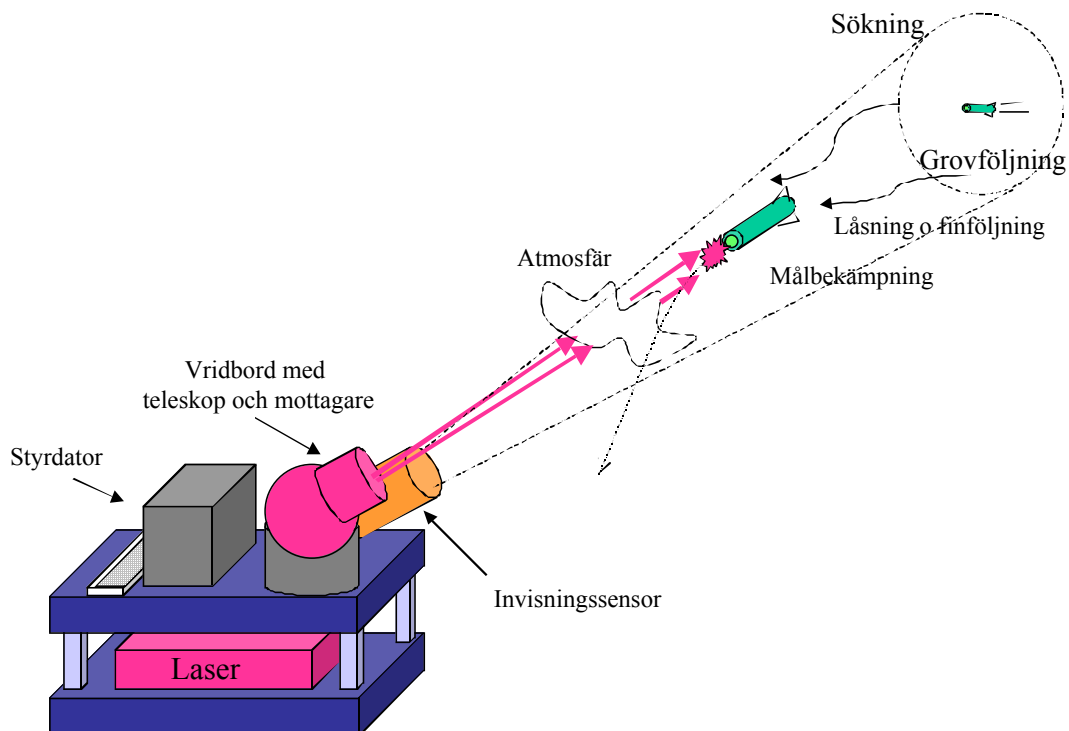
Det stora område som omfattar olika verkansformer och tillhörande lasrar illustreras i figur 2. Komplexitet och storlek på laservapen varierar högst väsentligt från den enkla antisensorlaser i form av en "ficklampa" till det stora komplexa laservapnet avsett mot strategiska mål och verkande på 1000-tals km avstånd.



Figur 2. Verkansnivåer för olika laservapen och antisensorlasersystem. Figur från FOI OM nummer[1].

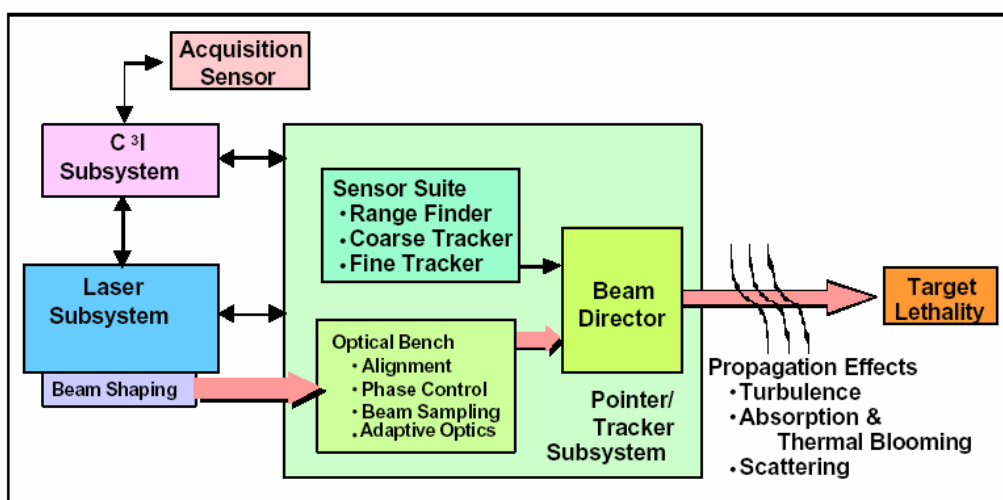
I har figur 3 och 4 har vi illustrerat typiska delsystem för ett laservapen- antingen det är avsett att verka som antisensorlaser eller som allmändestruktivt laservapen. Nedanstående framställning kommer att försöka att i mer detalj beskriva de olika delarna, ur såväl teknisk som grundläggande fysikalisk synpunkt.

- Målfångning sker med IR eller radarsensorer, därefter sker grovföljning vanligtvis med IR eller radar.
- Till Folföljning och målinmätning används IR och eller radar för träffpunktsbestämning.
- Aktiv avbildning med grindad bildförstärkare eller 3D fokalplansmatriser kan tänkas ge bättre upplösning för träffpunktsbestämning jfr. med IR.
- Laserbelysning ger en reflex som kan användas för optimering av det adaptiva optiska system (som skall fokusera laserstrålen så långt det går på målet) och kompensera för turbulens och effekter av laserns uppvärmning av luften (termisk distorsion).
- Den fokuserade strålen ger verkan i målet. Viktigt att energitätheten kan uppnå ett tröskelvärde (vanligen $1-10 \text{ kJ/cm}^2$ för plattformsstrukturer, avsevärt mindre för t.ex. optiska sensorer som verkar inom laserns våglängdsområde).
- Effektiv verkan kräver 0.1-5 sekunders belysning beroende på hur sårbart målet är (exploderande bränsletankar, hål i huv, hål i roder etc.). Belysningstiden beror även på vilket avstånd och under vilka atmosfärsförhållanden man verkar.
- Verkansverifiering sker vanligen via observation av den explosion som uppträder när målet bryts sönder. Mindre dramatisk verkansverifiering kan ske vid "soft kill" genom att observera robotavvikelse från målbanan, ändring av målets radaremission (aktiv radarrobot) etc.



Figur 3. Delsystem och funktioner i ett generellt laservapensystem.

Laservapenområdet består av olika delområden som vart och ett är lika viktiga för att ett laservapensystem skall kunna fungera i sin helhet.



Figur 4. De olika funktionerna gemensamma för alla laservapensystem. Efter ref.[2].

Ur teknisk synpunkt finns det flera utmaningar för laservapen. De viktigaste är:

- Generera tillräckligt hög lasereffekt/energi i kompakta källor
- Energiförsörja laserkällan på ett effektivt sätt
- Kunna kontrollera strålkvaliteten så att strålen fokuseras inom ett fläck som typiskt kan vara mindre än 10 cm i diameter.
- Rikta strålen exakt på målområdet under verkanstiden.
- Kunna utforma ett kostnadseffektivt, kompakt och tillförlitligt system som kan verka från olika bemannade (fpl, hkp, fordon, fartyg) eller obemannade (UGV, UCAV) plattformar.

Lyckas man fullt ut med dessa tekniska utmaningar är det ingen tvekan om att laservapen kommer revolutionera många aspekter av krigföringen.

Tillämpningar för högenergilasrar

Ur ett historiskt perspektiv har tillämpningarna för laservapen varit begränsade på grund av att högeffektlasrar (HEL) har varit otympliga för taktiska användningsområden. Historiskt sett förknippas laservapen med lasrar i MW-klassen som förbrukar stora mängder energi, har stor vikt och volym samt är mycket teknisk komplicerade. Dessa egenskaper innebar att laservapen tillhörde en verkansform som endast kunde installeras på mycket stora eller helt stationära plattformar. Stora forsknings- och tekniska resurser har krävts för att bedriva utveckling och studier inom HEL-området, vilket har begränsat aktörerna till de stora nationerna som USA, Tyskland, Frankrike, Ryssland (Sovjetunionen), Kina samt Storbritannien. Under det senaste decenniet har utvecklingen inom laserteknikområdet gått mycket snabbt och nya komponenter och teknologier har öppnat helt nya möjligheter[3]. Från att vara ett vapen för strategiska hot fokuseras HEL-tekniken alltmer mot taktiska tillämpningar och effektnivåer av storleksordningen 20 till 100 kW. Bortsett från den klassiska definitionen av laservapen studeras också nya verkansformer där laserteknik kan användas för att generera bredbrandig strålning. I avsnittet nedan ges en översikt av strategiska och taktiska laservapentillämpningar. Ett flertal av tillämpningarna som beskrivs nedan har analyserats i detalj i en nyligen utgiven rapport från försvarsdepartementet i USA där laservapenprogrammet utvärderades[4].

När lasertekniken utvecklas kommer man att hitta nya tillämpningar för högenergilasrar. Tillämpningarna kommer att utökas från missilförsvar till en rad andra inklusive motmedel, kommunikation och sensorer. Vi kommer att ge några exempel nedan.

Strategiska tillämpningar

Laservapen sorteras vanligtvis under gruppen strategiska vapentillämpningar där robotförsvaret och hotet från ballistiska missiler varit det pådrivande hotet.

Flygburet laservapensystem

Ett laservapen kan användas för att förstöra interkontinentala robotar under en uppskjutningsfas där de är som känsligast för extern påverkan. Genom att använda ett flygbaserat system på hög höjd kan räckvidden utökas och effekter från atmosfären reduceras. Systemet kan vara en del av ett större nätverk av verkan och spaningssensorer. Om det flygburna laservapnet utrustas med avancerade spaningssensorer (se ABL-programmet nedan) kan man också tänka sig att enheten opererar utan stöd från andra spanings- och varningssystem. Det primära målet är att skydda sig mot interkontinentala robotar. Ett viktigt kriterium är att täcka en stor yta globalt vilket kräver att flera system utnyttjas samtidigt. Viktiga parametrar för ett system designat för robotförsvar från en taktisk synvinkel är räckvidden och antalet tillgängliga skott. Som exempel kan nämnas att ABL-systemet förväntas ha en räckvidd på ca. 40 mil samt ett magasin på ca. 20 skott.

Eftersom laservapensystemet utrustas med avancerade sensorer kan man tänka flera sekundära tillämpningar. Spaning, upptäckt och informationsinhämtning är sekundära funktioner som kan utföras med ett flygbaserat laservapen liknande ABL. Vid taktiska tillämpningar krävs det att systemet kan operera på en lägre höjd. Andra tillämpningar kan inkludera verkan mot elektro-optiska sensorer på både flygburna fientliga plattformar samt luftvärnsrobotar. En möjlighet finns också att utnyttja systemet för att slå ut lågt flygande satelliter. I ett mer komplicerat system för robotförsvar kan man tänka sig ett markbaserat system som utnyttjar reläspeglar i rymden för att styra laserstrålen. Här ställs högre krav på kompensation av laserstrålen pga. atmosfärs effekter. De tekniska krav som ställs för ett flygbaserat laservapen utformat för att verka interkontinentala robotar har beskrivits i ABL-systemet ovan, se även ref. [5].

Rymdtillämpningar

Den mest komplexa och teknikkrävande tillämpningen av lasertekniken är placering av HEL-lasrar i rymden för laservapentillämpningar [6,7,8]. Flera teknologiska genombrott kan komma att krävas för att föra laservapentekniken ut till rymden. Ett väsentligt problem är att reducera komplexiteten hos systemet samt att minska vikt och volym för att anpassa till en uppskjutningsfarkost. Fördelen med att placera ett laservapen i rymden är möjligheten till global täckning samt den reducerade påverkan från atmosfärs effekter. Den primära laservapentillämpningen av ett rymdbaserat laservapen är som en del i ett globalt försvar mot interkontinentala eller liknande robotar. Som sekundära tillämpningar kan man tänka sig att ett rymdbaserat laservapen verkar mot satelliter och flygande farkoster som agerar på hög höjd. Kritiska teknologier för rymdbaserade laservapen inkluderar förutom laserkällan optik för målföljning och strålkompensering. Reläspeglar är en annan viktig komponent vid studier av rymdbaserat laservapen för att uppnå tillräcklig täckning. Ett rymdbaserat laservapen kan också fungera som en del i ett övergripande försvar mot interkontinentala missiler där olika typer av laservapen samt konventionella bekämpningsformer (anti-robotsystem) ingår. För att illustrera de höga krav tekniska krav som ställs på ett rymdbaserat laservapen ger några exempel på prestandakrav i Tabell 1.

Tabell 1 Exempel på tekniska krav på ett rymdbaserat laservapen[8]

Teknologi	Prestandakrav	Kommentar
Laserteknik	1-1.5 μm våglängd	Mindre optik vilket medför reducerad vikt/volym, större magasin jmf. med kemisk kemisk HF-laser
Lasereffekt	$\sim \text{MW}$	Hög intensitet vid målet
Skalbar optik	8-12 m	Generisk teknologi för många laservapentillämpningar
Målföljning	$\sim \lambda/10D$	Styrning av peksystem
Pekjitter	$\sim \lambda/4D$	Krävs för hög intensitet vid målet
Vågfrontskorrektion	$\sim \lambda/10$ vid hög effekt	Hög strålkvalité

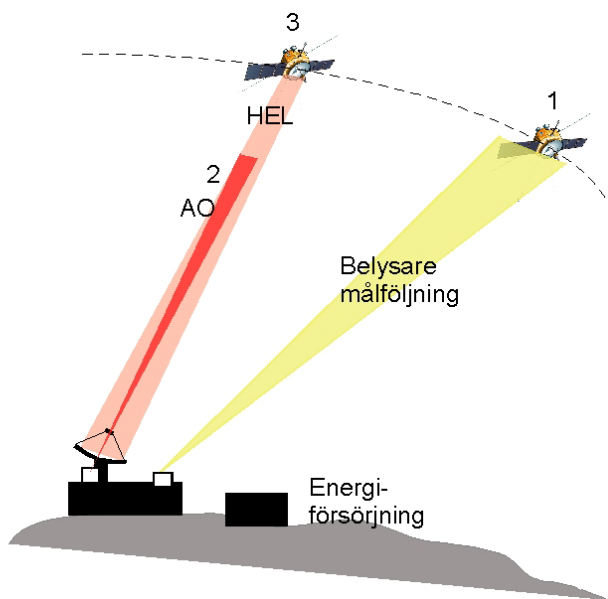
Vid studier av rymdbaserade laservapen är det en fördel att reducera våglängden hos laserkällan eftersom mindre optik kan användas och intensiteten skalar som $\propto \frac{1}{\lambda^2}$ där λ är våglängden. Med andra ord kan en betydligt lägre uteffekt hos en kortvågig laserkälla användas för att uppnå samma intensitet vid målet som en laser som opererar i ir-området med högre uteffekt. Enligt Tabell 1 ser vi att mycket höga krav ställs på målföljning och peknoggrannhet (pekjitter) hos ett rymdbaserat laservapen. Om vi antar att en våglängd kring $\lambda = 1.0 \mu\text{m}$ används och att optikaperturen är $D \sim 10 \text{ m}$ erhålls krav av storleksordningen, 1 och 25 nrad för upplösning/målföljning samt krav på peknoggrannhet. De långa verkansavstånden medför således mycket höga krav på pek- och följeprestanda hos systemet. Teknikkrav för ett rymdbaserat laservapen diskuterades nyligen av Founds med medarbetare[6].

Markbaserat laservapen

En annan strategisk konfiguration för ett laservapen ämnat som skydd mot interkontinentala robotar består av ett markbaserat HEL-system där reläspeglar i bana kring jorden kan användas för att styra laserstrålen. Fördelen med ett markbaserat system är att laserkällan med tillhörande energisystem inte behöver skjutas upp i rymden. Istället placeras ett antal reläspeglar i lämpliga banor för att en global yta ska täckas. Vikt, volym och energiförsörjning blir följaktligen inte lika kritiska som i ett rymdbaserat system. Verkan mot olika typer av spanings- och kommunikationssatelliter är en annan tillämpning för ett markbaserat laservapen. En komplikation med markbaserade laservapen är atmosfärs effekter som kommer att försämra strålkvaliteten väsentligt. Genom att placera lasersystemet på hög höjd kan dock påverkan från atmosfären reduceras. Moln som skymmer siktlinjen kan också utgöra ett problem för den här typen av system. Noggranna studier av molnstatistik krävs in placeringen av markbaserade system kan

bestämmas. Flera system krävs troligtvis för att uppnå mycket hög tillgänglighet. Reläspegel i rymden möjliggör bekämpning av satelliter i högre banor.

Två viktiga delsystem från tekniksynpunkt är adaptiv optik för korrigerande av atmosfärs effekter och aberrationer inducerade i systemet samt målföljnings- och pekfunktion. För att erhålla en effektiv verkan mot satelliter krävs det att laserstrålen kan bibehålla sin position exakt på målet under en längre tid t.ex. ~ 10 s för att skada en lågt flygande satellit (under antagandet att irradiansen är ca. 100 W/cm^2). Andra tillämpningar som är av intresse för markbaserade laservapensystem inkluderar t.ex. målbelysning, optisk kommunikation och målföljning. De tekniska kraven för ett markbaserat laservapen är höga; en laserkälla i MW-klassen krävs för att generera erforderlig effekttäthet på målet, utgångsoptikens apertur måste ha en diameter av storleksordningen ~ 3 m vid laservåglängden $1 \mu\text{m}$ samt ett avancerat adaptiv optisk system för att korrigera atmosfärs effekter. Ett exempel på ett scenario där en markbaserad HEL används för att skada en satellit illustreras i Figur 5. Här består systemet av tre delsystem; en laserbelysare/målföljning, AO-system med lasertechnik för att generera en konstgjord referenssignal från Na-skiktet i övre delen av atmosfären samt HEL-lasern som används för att förstöra satelliten.



Figur 5 Markbaserat laservapen som bekämpar ett satellitmål. 1. Belysning av mål för målföljning. 2. Adaptiv optik för kompensering-generering av referenssignal från Na-atomer i stratosfären. 3. HEL-verkan (belysare och AO används under tiden).

Olika koncept för ett markbaserat laservapensystem och den teknik som behövs har diskuterats ingående i en nyligen utgiven analys av området[4]. En översiktlig sammanställning av tillämpningar och teknik för strategiska laservapen ges i Tabell 2.

Tabell 2 Strategiska tillämpningar av laservapen

Hot	Bekämpning-HEL	Kommentar-teknik
Interkontinentala robotar	Flygburen, Ryymbaserad	Reläoptik för ryymb-HEL
Satelliter i låga banor	Markbaserat	AO-system för kompenserig
Geostationär satelliter	Ryymb	Reläoptik
System	Laserteknik	Delsystem
Flygbaserat	COIL, $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$, kemisk, $\sim 1 \text{ MW}$ klass	Målbelysning, följning, avståndsmätning, AO-kompenserig (atmosfär/lasersystem)
Markbaserat	Primärt kemisk laser av COIL-typ, fasta tillståndslasrar	Målbelysning, följning, AO-kompenserig för atmosfär/lasersystem
Ryymbaserat	HF studeras $\sim \text{MW}$ -klass, optioner $\lambda < 1.5 \mu\text{m}$, HF (övertoner), COIL, fasta tillståndslasrar	Reläspeglar, ihopfällbar optik, vikt och volym kritiska parametrar, extremt hög peknoggrannhet.

Taktiska tillämpningar

Ett stort intresse har under den senaste tiden riktats mot taktiska laservapentillämpningar. Den snabba teknologitvecklingen inom laserområdet, särskilt matriser av elektriskt pumpade halvledarlasrar, har gjort att taktiska tillämpningar bedöms som realiserbara på 10 till 15 år sikt. Det är den låga vikten och det enkla handhavandet som gör dessa lasrar intressanta för taktiska tillämpningar. Ett praktiskt problem vid användandet av elektriskt pumpade lasrar kan vara tillgången på elektrisk energi hos olika plattformar. Även mindre modeller av kemiska lasrar där slutna kretsar för kemikalier används är av intresse. Medeleffekten för taktiska laservapentillämpningar uppskattas till ca. 100 kW. Taktiska laservapen har betydligt kortare verkansavstånd jämfört med de strategiska tillämpningarna beskrivna ovan.

En mycket viktig egenskap vid studier av taktiska laservapentillämpningar är precision och begränsad verkan. I jämförelse med konventionella vapeninsatser, även precisionsbekämpning, har ett laservapen extremt hög precision och en begränsad verkanseffekt. Den primära kollaterala skadan som orsakas av ett laservapen är begränsad. En annan framtida vision är att ett laservapensystem kan användas både som sensor och verkansdel. En kritisk parameter vid olika typer av militära operationer är tiden mellan information från sensorer har bearbetats till dess att verkan sätts in. Genom att använda samma system som sensor och för verkan kan tiden minimeras. Ett exempel på väg här är ABL-programmet där sensorer och verkansdel sitter installerade på samma plattform. En annan intressant tillämpning är att utnyttja lasersystemet för kommunikation där lasertekniken erbjuder mycket stor bandbredd. Taktiska

laservapensystem har också diskuterats som mobila moduluppbyggda enheter där system kan transporteras och användas av olika plattformar.

Tabell 3 Exempel på kritiska parametrar för ett taktisk laservapensystem

Teknologi	Kritiska parametrar
HEL-kemisk, COIL, HF	Effekt > 50 kW kontinuerlig, Energi > 1 kJ för pulsad, $\lambda = 1.3, 2.8 \mu\text{m}$
Fasta tillståndslaser	Effekt > 20 kW, Energi > 1 kJ, $\lambda = 0.8-1.5 \mu\text{m}$
FEL	Effekt > 100 kW, $\lambda = \sim 1 \mu\text{m}$
Materialteknik	Optikkomponenter, AR-skikt, optisk kvalitet, skadetrösklar, kylning etc.
Målföljning, strålkontroll	Riktpunktsfel* < 0.25-10 μrad , stråldiameter vid mål
Strålstyrning	Pekjitter* < 0.25-10 μrad , hastighet > 0.5 rad/s, acceleration > 5 rad/s ²
Målväxling	< 2 s, beror på typ av mål (verkanseffekt)

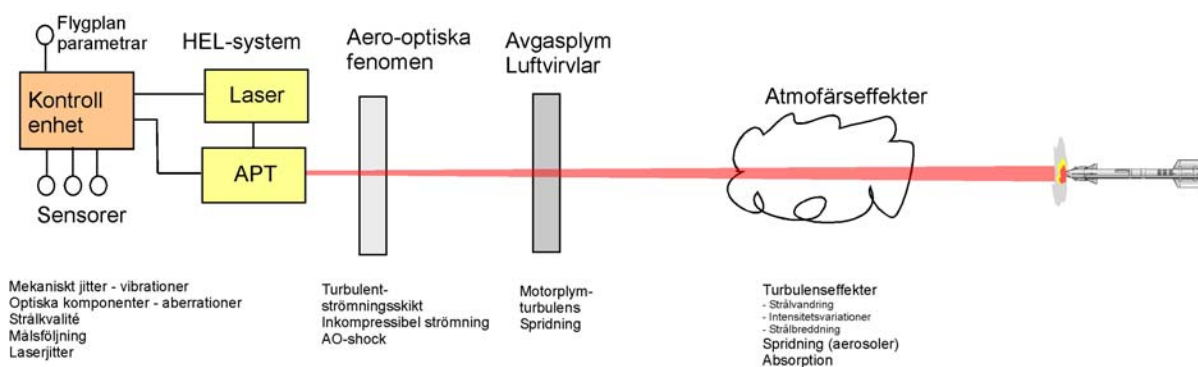
* Beror på tillgängligt verkansavstånd.

Högenergilaser i stridsflygplan

Olika koncept för ett flygande laservapen kan vara av stort intresse. Ett moduluppbyggt system kan t.ex. snabbt lastas ombord på ett större flygplan där ett teleskop finns monterat för att transmittera och styra laserstrålen. Ett annat alternativ är att permanent installera, eller utveckla speciella system, som kan användas i taktiska situationer från luften. Ledorden för ett taktiskt laservapen för verkan över kortare avstånd är hög precision och liten lateral skada som nämnts ovan. Graderad verkan är en intressant aspekt som ett laservapen erbjuder. Genom att variera energimängden som deponeras på målet kan en graderad verkan uppnås. Scenarion där hög precision är av yttersta vikt inkluderar strid i bebyggelse (SIB). Det taktiska laservapnet kan också anses som smygande eftersom strålloben är begränsad och laserstrålen osynlig för ögat. Ett taktiskt laservapen kan användas i tillämpningar som verkan mot kommunikationskanaler, RF och mikrovågsantennar, radarinstallationer, nät för elförsörjning samt orsaka små bränder. Verkansavstånden för ett taktiskt laservapen uppskattas till 3-5 km beroende på externa störningar och prestanda hos systemet. En implementering av laservapentechnik på ett stridsflygplan i framtiden (20 – 30 år) kan dramatiskt förändra förutsättningarna för luftstrid och stridsuppgifter för flygande plattformar. Ett futuristisk koncept som diskuterats i USA är begreppet "Foto-fighter" där laserteknik utnyttjas fullt ut både för skydd, spaning och attackscenarion[9].

En naturlig utveckling av ett taktiskt laservapen på en större flygande plattform är att skala tekniken till taktiskt jetflyg. Här kommer det dock att ställas mycket höga krav på teknologiutvecklingen, speciellt vad det gäller lasertekniken, eftersom vikt, volym och

energimängd är begränsad på ett taktiskt jetflygplan. En naturlig utveckling är att dagens laserbaserade motmedelssystem (DIRCM) som utvecklats för att skydda flygplan och helikoptrar mot olika typer av värmesökande missiler kommer att gradvis förändras till att innefatta mer offensiva förmågor. Dagens DIRCM-system utnyttjar teknik som baseras på att hotande robotar vilseleds genom störning. En framtida utveckling av dessa system innehåller laserteknik för spaning, måligenkänning och verkan. Första steget här är att verka inom elektro-optiska sensorer våglängdsområde för att förstöra t.ex. detektorer. I nästa steg används en mer kraftfull laser som kan förstöra aperturer hos EO-sensorer.



Figur 6 Kritiska parametrar och effekter som måste beaktas vid studier av HEL-teknik implementerad på ett stridsflygplan.

De taktiska tillämpningar som kan vara av intresse för ett laservapen implementerat på ett stridsflygplan inkluderar primär luft-luft samt luft-mark situationer. I Tabell 4 summeras några av de intressantaste tillämpningarna för ett taktiskt laservapen. Utöver direkta verkansfunktioner kan lasersystemen ombord användas för spaning och identifiering som stöd åt andra stridsenheter. Från ett nätverksperspektiv kan man också se plattformen som en avancerad sensornod som kan användas för spaning och verkan. Kritiska teknologier för ett taktiskt laservapen har diskuterats ingående i ref.[4]. Externa störningar och kritiska teknologier måste studeras ingående för implementering av HEL-teknik på ett taktiskt jetflygplan. En schematisk bild av de kritiska parametrar och effekter som måste undersökas visas i Figur 6.

Tabell 4 Flygande taktiskt laservapen

Hot	Bekämpning-HEL	Kommentar
Värmesökande robotar SAM	Slå ut sikten, EO-sensorer primärt, sekundärt slå ut detektor	Sikten, EO-sensorer, tidig upptäckt viktig
Värmesökande robotar AA	Skada detektor i våglängdsbandet, Skada på dom, UV-filament – bredbandig störning	Tidig upptäckt, gradvis övergång från störning till förstörande verkan
Sikten optiska/EO	LV-ställningar på marken, förstörande verkan	Graderad verkan av intresse, bländning av sikten/EO-sensorer
UAV	Skada i EO-sensorer, skada lätta mekaniska strukturer	

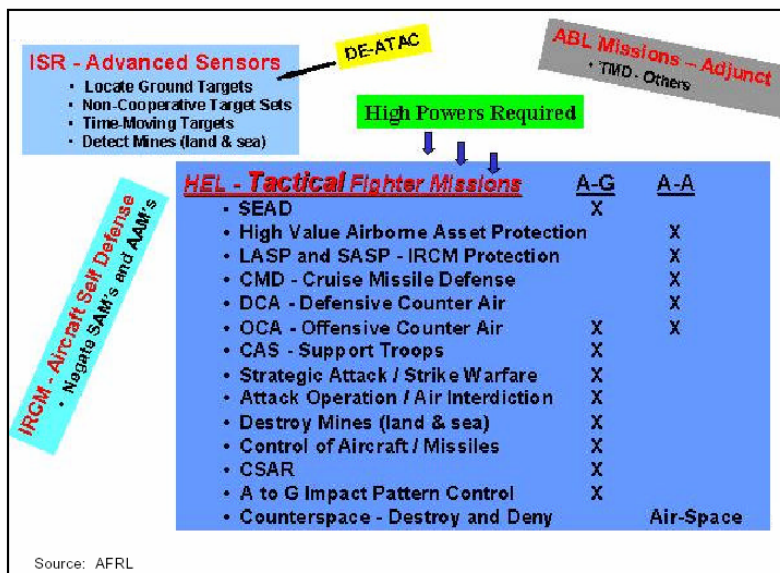
Ett stridsflygplan, bemannat eller obemannat kan erbjuda ”speed-of-light engagement” för ett antal funktioner som luftstrid, bekämpning av kryssningsrobotar och robotar i allmänhet inklusive radarmålsökande, SEAD (Suppression of Enemy Air Defense), långgräckviddig måligenkänning, spaning luft-mark samt verkansverifiering. Det skulle i mångt och mycket innebära ett paradigmskifte i användandet av stridsflygplan. Flera genombrott talar för framtida laservapen på stridsflygplan. Ett är möjligheten att generera höga elektriska effekter, där man förväntar sig kunna generera 1 MW inom 5 år. Ett annat är utvecklingen på lasersidan (diodpumpade fastatillståndslasrar, fiberlasrar etc.) som tillåter kompakta lösningar lämpade för inbyggnad eller i en podplacering. År 1970 vägde ett lasersystem som producerade 100 kW ca. 15 ton. Idag väger ett liknande system ca. 1,5 ton. Flera studier inom det amerikanska flygplanet (”New World Vistas”, AGF 2025 och DE-ATAC) stödjer tanken på högenergilaser (HEL) i stridsflygplan.

Några preliminära systemdimensionerande parametrar för effektiva HEL-tillämpningar i fpl är:

- Joules per cm² krävs för att effektivt bekämpa mål.
- Strålkontroll bedöms klaras med ”state of the art” teknologi.
- Största praktiska aperturen i ett stridsflygplan är ca 30 cm.
- Målbelysningstider är konsistenta med flygplanstaktik och nuvarande laser/EO system.
- Laserkrav kan sammanfattas som 100 kW under några sekunder och en strålkvalitet motsvarande >0.4 i Strehlkvot.



Figur 7. Övre bilder- laservapen studeras för JSF och framtida UCAV. Undre en laservapenpod- ”mock up” (TRW).



Figur 8. Tillämpningar för högenergilaser i stridsflygplan. Ref. 2.

Några kommentarer till tillämpningar:

Laserradar

Den höga lasereffekten (10-100 kW) kan utnyttjas för att överbrygga en av de viktigaste begränsningarna för dagens laserradarsystem nämligen avsökningshastighet. För att ge ett perspektiv:

- Dagens djupsonderande lasersystem (för marina tillämpningar) kräver ca. 5 mJ/puls inom det gröna våglängdsbandet för att nå en räckvidd i klassen 10-40 meter från en flygande plattform. Med enkeldetektorer och en pulsrepetitionsfrekvens (prf) på 10 kHz som man maximalt kan åstadkomma idag innebär det en medellaseffekt på 50 W och avsökningshastighet på 36 km²/h med 1 sondering /m². Om man kunde utnyttja en 50 kW laser (med samma korta laserpuls) skulle man kunna rent teoretiskt kunna öka avsökningshastigheten med en faktor 1000 vilket skulle innebära en strålbredd på nära 30 km vid Mach 1. Förutsättning för detta är att en detektormatris och en spaltformig stråle kan användas så man kan undvika extrema skannerkrav.
- För laserradar, t.ex. optiklokalisering, se genom vegetation, måligenkänning kommer den höga lasereffekten att kunna utnyttjas så att man undre kort tid kan lokalisera och känna igen mål inom stora synfält. Typiska laserradareffekter i dagens system opererar i effektklassen 1-10 W med begränsad vinkeltäckning och i regel krävs invisning med radar eller IR. Med högre effekt kan detta undvikas och momentet från upptäckt till bekämpning förkortas och förenklas.
- Den höga effekten kan även användas för att detektera, blända och störa optiska system över stora momentana synfält vilket därigenom ger nya förmågor till för DIRCM liknande system.

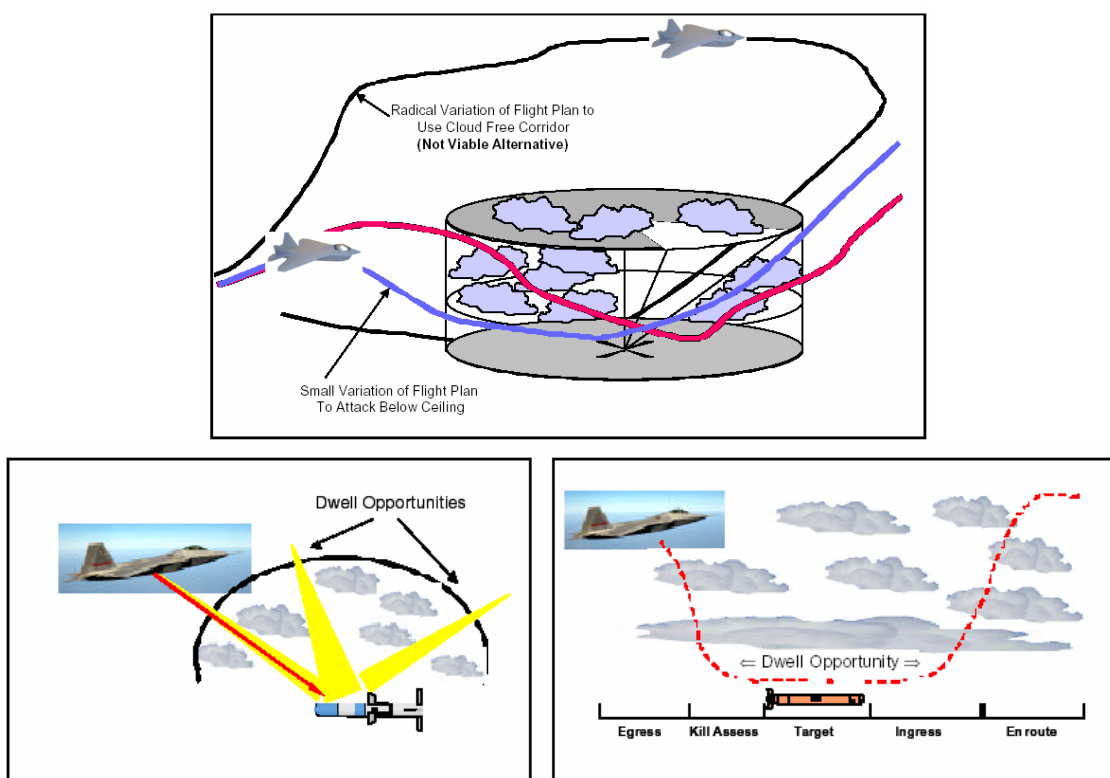
Kommunikation

- Den höga lasereffekten kan innebära samtidig sändning till många mottagare eller indirekt kommunikation (brutna siktlinjer). Den höga lasereffekten kan också innebära möjligheter till kommunikation mellan flygande plattformar och undervattensplattformar.

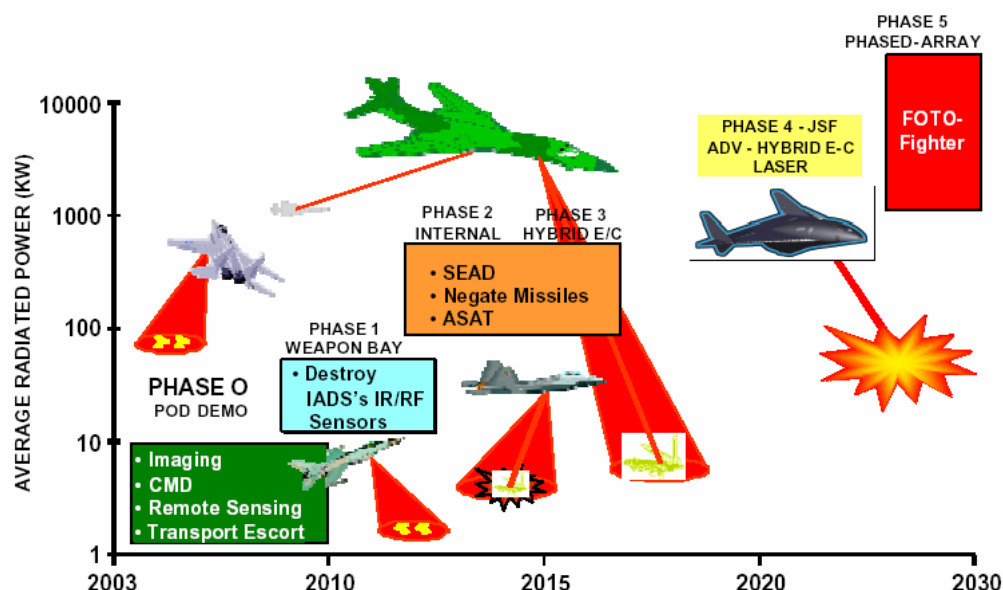
En begränsning för laservapen på flygplan är framförallt vädret och speciellt moln. Viktiga parametrar är molntäckning och molnbas. Olika anfallsprofiler kan tänkas beroende på molnsituationen enligt Figur 9.

I amerikanska försvarsdepartementets studie "High Energy Laser Weapon Systems and Applications" dras följande slutsatser beträffande HEL på taktiska flygplan:

- Man bör ha ett system operativa inom 10-15 år.
- De tekniska utmaningarna innefattar främst:
 - Effekt till viktförhållandet måste reduceras
 - Strålkontroll för vibrerande omgivning och aerooptiska effekter
 - Termisk hantering av överskottsvärmen.
- I närtid förordas installation och prov med lasereffekter i området 1-30 kW för prov och utvärdering.
- De tillämpningar som bör studeras är egenskydd mot alla typer av robotar, laserradartillämpningar och luftstrid.



Figur 9. Olika sätt att hantera molnsituationen vid anfall med laservapen mot mark/sjömål. Efter ref. 2.



Figur 10. "Roadmap" för högenergilaser på flygplan i USA. Från ref 2.

Armetillämpningar i NBF.

En mycket viktig tillämpning för ett taktiskt laservapensystem är luftförsvar. Här kan man tänka sig både fasta, och mobila, installationer. Det primära hotet är olika typer av medeldistansrobotar, raketer, granater samt små lätta flygande spaningsfarkoster. Även verkan mot större flygande plattformar som t.ex. helikopterhuvar är av intresse. Fördelarna lasertekniken har jämfört med konventionellt luftvärn inkluderar; snabb målväxling, ballistik kan försummas, stort magasin samt "projektil" som färdas med ljusets hastighet. Ett laservapen avsett för luftvärn behöver utnyttja befintliga långräckviddiga spaningssystem (radar- och optikbaserade) för att få en tidig varning. Laservapensystemet bör vara utrustat med separata system för målföljning på kortare avstånd. Ett exempel på luftvärntillämpning för laservapen är USA-Israels samarbete med MTHEL och THEL som beskrivits ovan[10]. I Tabell 5 beskrivs några luftvärnstillämpningar för ett laservapen.

Atmosfäreffekter som turbulens och olika typer av aerosoler påverkar prestanda hos ett laservapen avsett för luftförsvar. Eftersom utbredningssträckan i den nedre delen av atmosfären kan bli relativt lång måste dessa effekter beaktas noggrant. Turbulenseffekternas inverkan på laserstrålens kvalitet är som störst vid låga höjder. Aerosoler som förekommer på stridsfältet samt moln kan också påverka prestanda.

Tabell 5 Luftvärnstillämpning för laservapen

Hot	Bekämpning-HEL	Kommentar
Raketer	Hög medeleffekt, HF-laser	Termisk effekt
Granater	Hög medeleffekt, HF-laser	Termisk effekt
Kryssningsmissiler	Verkan mot stridsdel alt. sensorer	Lågt flygande, problem med atmosfärsinverkan
UAV för spaning	Verkan mot sensorer	Låg hastighet

Några av de mer intressanta tillämpningarna för armen kan vara:

- *Motverka spaningshotet*
 - UAV och andra spaningsplattformar kan snabbt lokaliseras via retroreflexer och störas eller förstöras med högenergilaser.
 - UAV, attackhelikoptrar och spaningsfordon kan bekämpas på relativt långa avstånd. Speciellt mindre UAV kommer att vara mycket sårbara för HEL.



Figur 11. Laservapen bedäms vara viktiga för att motverka spaningshotet från UAV och andra spaningsplattformar. UAV förväntas vara sårbara för måttliga lasereffekter.

- *Skydd av plattformar (VMS)*
 - HEL är en naturlig fortsättning av DIRCM men med fördelen att kunna förstöra robotar och stridsdelar oberoende av målsökare och styrprincip.

- *Luftförsvar*
 - Helikoptrar och attackflyg och framtida UCAV är sårbara för lasere exponering, speciellt under deras inmättnings- och målutpekningssfas. Effekter sträcker sig från störning till skada på vitala delar (huvar, bränsletankar, roder etc.).
 - Raketer, stridsdelar, robotar och artillerigranater har visat sig kunna bekämpas med högenergilaser (se THEL-proven nedan).



Figur 12. Illustration om hur högenergilaser neutraliserar infallande granater och substridsdelar. Bild DARPA.

- *Rensning av minfält*
 - En obemannad markfarkost kan lokalisera och förstöra speciellt ytlagda eller möjligen nära ytan liggande markminor.

Ett projekt i USA (ZEUS™) studerar för närvarande möjligheterna med att använda HEL-system för mindestruktion. En laser på ca 1 kW bedöms tillräcklig för att neutralisera ytlagda minor och icke exploderad ammunition (UXO) på 50-300 meters avstånd. Ett uppenbart merutnyttjande är störning av EO sensorer (jfr. FOI:s LYSA). Avståndsneutralisering är attraktivt pga. säkerhetsriskerna vid manuell hantering.



Figur 13. ZEUS™ utnyttjas en synlig laser och en kamera för att hitta minor och stridsdelar och en 500 W-1 kW för att förstöra dessa på upp till 300 m avstånd.

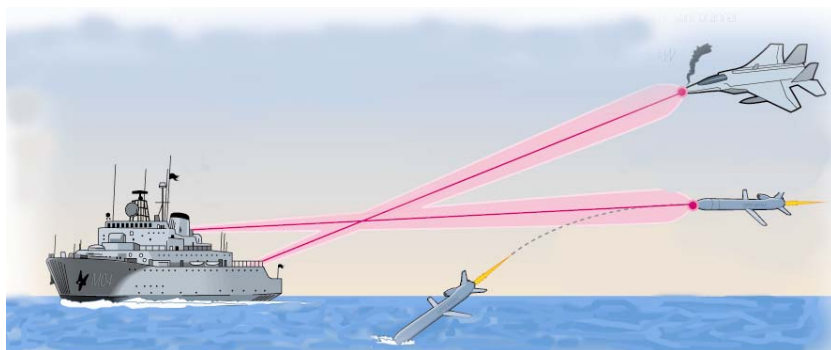
Mekanismen för destruktion är att initiera en explosion av explosivämnet via upphettning. Om ammunitionen har ett metallhölje behöver man inte bränna igenom det för att få verkan. Om minan har ett platshölje bränner man igenom. Verkan är inte beroende av tändanordningen. Systemet har mycket hög verkningsgrad - över 97 % sedan väl detektion skett. Under prov 1999 neutraliserades över 500 minor och UXO:s på avstånden mellan 30-250 meter.

Marina tillämpningar

Ett tillämpningsområde där HEL-system har studerats under en längre tid är för skydd av fartyg[11]. Eftersom krafttillgången kan anses som relativt stor på ett större fartyg kan olika typer av lasersystem studeras. Det övergripande hotet mot fartyg inkluderar lågt flygande robotar s.k. "Sea-skimmers" som avfyras från långt avstånd. Dessa robotar kan skjutas från land eller ett fientligt fartyg. Till gruppen kan också konventionella kryssningsmissiler räknas vid användning mot sjömål. Ett annat prioriterat hot består av laserstyrda bomber som släpps från flygplan på hög höjd. Raketer kan också avfyras taktiska flygplan eller helikopter. Ett hot som aktualiserats under de senaste åren är av asymmetrisk karaktär där t.ex. snabba patrullbåtar (eller liknande) fylls med explosivämnen för att användas i attacker mot större fartyg.

Skydd av fartyg är en uppenbar tillämpning när det gäller laservapen. Nyligen har flera studier¹² pekat på möjligheter att med EM-vapen skydda fartyg. Det är främst framtida "sea-skimmer" som kommer med Mach 3-4 under stora g-manövrar som utgör ett allvarligt hot och där EM vapen kan ge ett verkningsfullt skydd. Här kommer andra system som luftvärn till korta. Nya uppdykande hot som snabba patrullbåtar med explosivämnen inne i hamnområden kan även vara lämpliga mål för ett EM-vapen, liksom mer konventionella vapen aktuella för kustområden (attackhelikoptrar, robotskyttar på land, etc.). Andra hot kommer från smygpassade attackflygplan som ger kortare förvarningstid. "US Navy" kommer att ersätta sina 31 jagare och 51 fregatter

med 32 st. av de nya DD-21 "Land Attack" jagare. Före dessa fartyg kommer man att ha ett elektriskt framdrivningssystem vilket lämpar sig för lasersystem.



Figur 14 Illustration av ett HEL-system installerat på ett fartyg för skydd mot lågt flygande missiler.

I Tabell 6 summeras de viktigaste tillämpningarna för ett fartygsbaserat laservapensystem. För att uppnå maximal effekt bör ett laservapen installerat på ett fartyg kompletteras med ordinär bekämpning där luftvärn och missiler avsedda för självskydd används. Utöver verkanseffekter kan lasersystemet användas för målinmätning och målföljning. Man kan också tänka sig att lasersystemet kan användas för att blända sensorer. Här krävs dock att laserns våglängd överensstämmer med sensorns känslighetsområde.

Tabell 6 Tillämpningar av laservapen för skydd av fartyg

Hot	Bekämpning-HEL	Kommentar
Lågt flygande robotar, "Sea-skimmers"	Verkan mot radomer	Största hotet mot fartyg, låg signatur, långa skjutavstånd, höga hastigheter (upp till Mach 4), korta reaktionstider
Laserstyrda bomber från flygande plattformar	Verkan mot dom/explosivdel, verkan mot belysande lasersystem	
Raketer från fpl/hkp	Verkan mot explosivdel	Korta avstånd
Asymmetriska hot, patrullbåtar, terroristangrepp etc.		Korta avstånd

Ett laservapen installerat på ett fartyg kommer troligtvis att använda elektrisk pumpade laserteknik. De två främsta kandidaterna inkluderar fri elektron laser (FEL) och fasta tillståndslasrar som matriser av laserdioder. FEL-tekniken har studerats under en längre tid i USA för marina laservapentillämpningar. En fördel med FEL med avseende på marina tillämpningar är möjligheten till våglängdsavstämning. Den marina miljön bedöms som mer komplicerad jämfört med "konventionell" atmosfär pga. dimma, regn, våginducerade effekter etc.

En Mach 4 missil som rör sig 3 meter ovanför vattenytan kan bekämpas ca. 20 sekunder efter det att den går att upptäcka (avstånd ca 25 km). Först måste detektion, målfångning, klassificering och överlämnande till motverkanssystemet ske. Om man bemöter med en anti-robot robot måste den accelerera till Mach 3 på några sekunder. Detta gör att träffavståndet kommer att ligga relativt nära fartyget, kanske några km bort. Om man missar med en robot har man ingen andra chans såvida man inte skjuter salva. Det är bl.a. därför som EM-vapen är av stort intresse pga. bekämpningsförmågan med ljusets hastighet. Under de 2-4 sekunder som en laser behöver verka rör sig M4 roboten 2.5-5 km. Detta innebär att bekämpning kan ske på långa håll, åtminstone 10-15 km från fartyget. Tabell 7 visar sårbarhet för missiler i olika aspekter.

Ett laservapen på fartyg kommer att verka i en besvärlig utbredningsmiljö. Den optimala våglängden kommer att variera beroende på var i världen man opererar. Om laser placeras på fartyget kommer man att uppleva "head-on"-problemet med inverkan av termisk distorsion ("thermal blooming"), se senare avsnitt. Det är därför relevant att ha luftburna lasrar för fartygsskydd (åtminstone om man talar om klassen hangarfartyg).

För fartyg studeras diodpumpade lasrar och frielektronlasrar för vapentillämpningar.

Tabell 7. Sårbarhet hos missiler för laservapen (efter ref. 12).

Kill Assurance	Effective Range	Type Kill	Aim Point	Engagement	
				Head-on	Crossing
High	Short	Structural	Propulsion System	No	Yes
			Structural Member	No	Yes
		Payload	Warhead	No	Yes
			Propellant	No	Yes
		Aerodynamic	Radome	Yes	No
			Control Surfaces	No	Yes
		Control System	Autopilot	No	Yes
			Other electronic control systems	Yes	No
		Sensor Destruction	RF & EO Seekers	Yes	No
			Imaging Sensor	Yes	No
Low	Long	Sensor Dazzle	E/O Seeker	Yes	No
			Imaging Seeker	Yes	No

Internationella operationer

Dessa operationer kännetecknas för svensk del oftast inte av direkta krigshandlingar. Man behöver dock ibland göra kirurgiska ingrepp utan att skada människor. Här kan högenergilaser få en plats. Laser brukar anföras som ett icke-letalt vapen avseende bländning av sensorer. Med högre effekt kan man skada t.ex. kommunikations- och

radarantennar, förstöra elledningar, sätta eld på ett fordon eller punktera däck, sätta eld på byggnader, punktera vapen som minor etc. Ett laservapen är tyst och strålningen osynlig. Detta talar för användning i en kritisk situation där vapeninsats kan "trigga" våldsamt motverkan.

Vid en insats vid internationella operationer kan avstånden vara måttliga eller korta och relativt små energinivåer, kanske några kJ kan ge önskad effekt. Det är vidare önskvärt att verkansavståndet är någon eller några km så att systemet inte drar på sig onödig uppmärksamhet. Man kan tänka sig mindre system för fordon med 1-10 kW effekt och maximalt 0.5-1 km verkansavstånd. Med ett krav på inriktning < 10 cm behövs peknoggrannheter på några tiondels mrad. För avståndsverkan upp till 10 km (för att t ex hålla sig utanför porte för konventionellt LV eller "manpads") behövs kanske 10 μ rad peknoggrannhet. För en helikopterburen utrustning kanske man kan tänka sig 100 kW och 50 cm optik medan 10-20 cm optik bör räcka för närtillämpningar från fordon eller tak. I städer kan man behöva ett mindre vapen som kan användas från tak.

Andra tillämpningar för högenergilaser

En hög laserenergi kan innebära förbättring av prestanda för etablerade tillämpningar som DIRCM, laser radar, laserbelysning, laserutpekning, kommunikation etc som tidigare nämnts. Ofta förutsätter detta att man kan modulera eller pulsa lasern så att den passar för tillämpningen i fråga vilket inte alltid är givet. Nedan har vi försökt lista tillämpningar som kan vara av intresse vid sidan av vapentillämpningar.

- *Sensortillämpningar*
 - Laserradar- passar konceptet scenbelysning och fokalplanematisering-man kan uppnå stora momentana synfält för målupptäckt/igenkänning och snabbt fokusera en eller multipla strålar för att oskadliggöra hoten.
 - Snabb kartering/spaning över stora området-terrängavbildning, djupsondering, se genom vegetation etc.
 - Långa räckvidder för målinmätning, följning och måligenkänning – i detta avseende kan kompatibilitet med radar uppnås vid klart väder.
 - Målutpekning, målupplysning, scenbelysning för egna eller andra sensorer (NBF-konceptet). Detaljspaning på mycket långa håll (fotospaning) även på natten. Verkansverifiering.
 - Optisk väderradar- långräckviddig sondering av vind, partiklar etc.
 - Fjärranalys av B/C stridsmedel- den höga laserenergin används främst för att från långa håll detektera förekomst av uppdykande aerosolmoln-om teknik kan utvecklas för höga effekter i UV- eller IR området kan identifiering också ske på långa håll.
 - Fjärrutlösning av nedsläppta minor och andra konventionella vapen.
 - Referenssignal för adaptiv optik (genom excitation av natrium i övre delen av atmosfären).

- Avancerade syntetisk apertur laser radar, alternativt matris av laserradarsystem som kommunicerar mellan varandra och faslåses för att ge hög lasereffekt och hög upplösning. Bygger bl.a. på antagandet om ett framtida GPS med mm-precision i positionering.

- *Telekrig*

- Förbättrade störsystem- långa räckvidder och/eller stor momentan täckning för bländning och störning. T.ex. kan man tänka sig att samtidigt blända en folkmassa eller truppkoncentration för att förhindra angrepp. Irradiansnivån 1 W/m^2 ger inom det synliga området ger exempelvis klart obehaglig bländning för det obevakade ögat, en 10 kW laser kan momentant generera detta över ett 100x100 meter stort område.
- Detektor/domförstörande verkan för båda EO- och radarrobotar-så pass att det påverkar målsökarfunktionen.
- Initiera luftgenombrott runt antenner för radar och kommunikation (femtosekundspulser-laserteknik).

- *Kommunikation*

Fri optisk kommunikation är av intresse som komplement till radioteknik framför allt genom att den är tyst, säker, svårstörd, har mycket hög bandbredd. Vidare finns inga frekvensallokeringsproblem- något som redan nu hämmar tanken på ett fullt utbyggt NBF.

- Optisk kommunikation över långa avstånd (100 tals km) om fri sikt.
- Viss förmåga till optisk kommunikation genom moln och dimma.
- Kommunikation ned i /upp genom vattnet.
- Viss förmåga till optisk "broadcasting"
- Indirekt kommunikation (bruten siktlinje), t.ex. via terräng, moln eller rena atmosfärsreflexer (optisk "kommunikationspåle" som kan nå behöriga). UV-laser inom det solblinda området är av stort intresse för indirekt närkommunikation (några km).
- Samtidig "avläsning" av en stor mängd retromodulatorer (t.ex. från marksensornät).

- *Kraftöverföring*

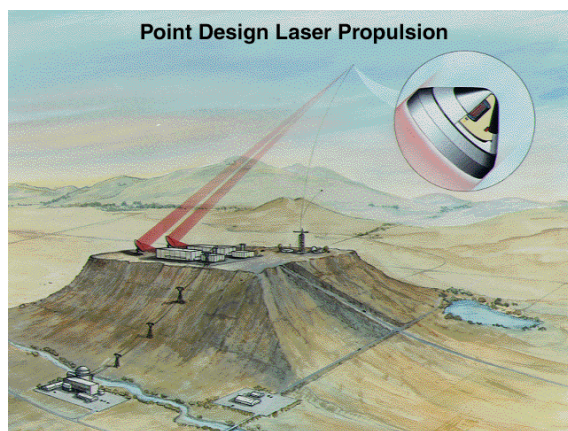
Med hjälp av laserteknik kan man tänka sig att föra över energi över långa avstånd utan fasta transmissionsledning. En fördel här är att flexibiliteten blir hög och att inga fasta förbindelser krävs. Principen är att använda fotovoltaiska celler (eller liknande) för att omvandla laserljuset till elektrisk energi. Mottagaroptik krävs för att samla upp det överförda laserljuset. Alternativt används stora matriser av fotovoltaiska element. Den primära tillämpningen som hittills diskuterats inkluderar energiöverföring till satelliter

och andra lätta rymdbaserade farkoster. För överföring energi på marken och i flygande tillämpningar för militära ändamål krävs hög effektivitet vid energiomvandlingen för att tekniken ska vara praktiskt användbar. En tillämpning kan vara att skicka energi till lätta flygande spaningsfarkoster som t.ex. en UAV för att ladda batterier. En annan ide är att utnyttja principen för energitillförsel till andra plattformar speciellt obemannade farkoster.

Man driver UAV, UGV eller AUV:s med laserteknik för att förlänga aktionstiden. Dagens bästa kommersiella batterier har en specifik energilagringsskapacitet på ca 100 kJ/kg och framtida batterier 2-300 kJ/kg. motsvarande specifika effekter är 1-20 kW/kg. De bästa solcellerna ligger idag på ca 15 % verkningsgrad. Man inser att en 10-100 kW laser skulle kunna vara intressant i detta sammanhang. Här kan man jämföra med solen som på jordytan ger ca 1 kW/m² irradians inom i huvudsak det synliga området.

- *Framdrivning.*

Laserteknik kan användas för att driva motorer i ultralätta farkoster [13,14,15]. Genom att fokusera laserljuset kan detonationer erhållas då genombrott i ett medium som t.ex. luft sker och en dragkraft till motorn erhålls. Tekniken studeras för rymdtillämpningar där tanken är att man kan skjuta upp små farkoster med laserteknik. Ett exempel på hur tekniken kan användas för framdrivning illustreras i Figur 15. Hittills har blygsamma uppskjutningssträckor visats, storleksordningen 20 till 40 m i laboratieförsök. Resultaten visar dock att principen är riktig och kan möjligtvis skalas upp med framtida teknikutveckling både vad det gäller laserteknik och utveckling av extremt lätta farkoster.



Figur 15 Schematisk beskrivning av laserframdrivning av en lätt flygande farkost (källa: LLNL, USA).

- Framdrivning. Man har undersökt möjligheten att framdriva raketer via laserinitierad förbränning från marken.
- Space elevator¹⁶. I ett fantasieggande koncept undersöker NASA möjligheten att bygga en rymdhiss för att via en kabel skicka upp laser till rymden ”klättervägen”. Änden på kabeln sträcks och förs uppåt via effekten från en fri elektronlaser på marken. När kabeln är på plats kan

man förra upp last med mekanisk rörelse. Man tror att detta är genomförbart inom 15 år till en kostnad av 400 miljarder kronor. Systemet skulle reducera uppskjutningskostnaden med en faktor 100. Det krävs ca. 380 kW i medeleffekt för att skicka upp 20 ton under en månad.

- *Röjning av minor och blindgångare*

En tillämpning för HEL-system som har diskuterats är att utnyttja energin i laserstrålen för att på termisk väg röja minor och blindgångare. Andelen minor och blindgångare har visat sig vara ett stort problem, både under pågående och efter olika typer av konflikter. Ett system för minröjning skulle kunna vara installerat på ett fordon eller en helikopterplattform. Minor och ammunition som inte exploderat kan röjas på termisk väg med laserteknik. Verkansavståndet för ett system är ganska kort, ca. 200 till 300 m, beroende på lasereffekt och optik för strålformning (fokusering). En fördel är att använda kortvågig laserstrålning är att stråldiametern kan fokuseras bättre jämfört med kemiska lasrar som opererar i ir-området (HF/DF). Materialegenskaper hos minorna och ammunitionen kommer att påverka verkans effekter. Två lasertekniker kan användas för ett dylikt system. Fasta tillståndslasrar som pumpas elektriskt, där matriser av halvledardioder och fiberlasrar, är två intressanta kandidatteknologier där utvecklingen sker snabbt. Ett alternativ kan också vara att utnyttja en COIL-laser med slutet system (taktisk HEL för flygande plattform) där effekter av storleksordningen ~10-50 kW kan användas. Minor som utlöses på akustisk väg kan möjligtvis röjas genom att ett dielektriskt genombrott i atmosfären skapas vid minan med hjälp av laserstrålningen varvid en ljudknall genereras.

- *Övriga*

En mängd mer eller mindre fantasifulla förslag på högenergilaseranvändning kan tänkas och många vilda ideer har också florerat under årens lopp. Vi kan nämna några utan närmare kommentarer om realiserbarhet:

- Väder och miljöpåverkan
 - Rensa flygfält från dimma, temporärt kunna se genom snö, moln och dimma.
 - Avisning, fjärruppvärmning av plattformar/apparatur i sträng kyla.
 - Isbrytning – underlätta isbrytning via fartygs- eller flygburen högenergilaser.
- Holografisk projektor för vilseledning¹⁷. Visuellt projektion av rörliga mål tillsammans med rörlig enkel IR och radarsignatur skulle kunna ge skenmål. Visuellt projektion av skenbakgrunder skulle kunna eliminera byggnader och vägar eller t.o.m människor.
- Fjärrhärda kemiska föreningar – målarfärg . skifta från klart till ogenomskinlig.
- Excitera akustiska signaler på vatten- eller jordytan som analyseras via sensorer i eller utanför mediet ifråga.

- Avancerad syntetisk aperturlaserkedja för detaljspaning från hög höjd eller från rymden.
- Avancerat laservapen med multipla aperturer. Central laser ger tidssynkronisering och flera lasrar synkroniserar sina pulser så att effektiv ”kontinuerlig” laserverkan uppnås.

Nya koncept

I det här avsnittet kommer några nya koncept för laservapen att diskuteras. Som nämnts tidigare kan definitionen laservapen kategoriseras på olika sätt. Vanligtvis benämns laservapen system där stora mängder optisk energi överförs för att förstöra ett mål.

UV-jonisering av luft

Ett nytt begrepp som börjat studeras under den senaste tiden är jonisering av atmosfären med kortvågig laserstrålning där elektriskt ledande kanaler kan bildas[18,19]. Genom att använda extremt korta laserpulser (storleksordningen femtosekund) kan höga effekttätheter genereras vilket orsakar icke-linjära fenomen i atmosfären. Genom multifotonjonisering kan en elektrisk ledande kanal (filament) skapas. Ett annat mycket intressant fenomen är att skapa plasma vilket emitterar en bredbandig strålning. Här finns möjligtvis förutsättningar att bekämpa icke-optiskt styrda hot med laserteknik. Pulser med mycket höga energitätheter kan också genereras eftersom dimensionerna på filamenten är små. Typiska dimensioner hos filamenten är 100 till 200 μm i diameter. De små dimensionerna hos filamenten indikerar också att effekter från turbulens i atmosfären kan försummas eftersom storleken på turbulenscellerna är betydligt större än filamentdimensionerna. UV-jonisering av luft för att skapa ledande filament studeras för tillfället av flera grupper på laboratoriestadiet. Den snabba utvecklingen inom lasertekniken vilken möjliggör generering av femtosekundspulser med hög energi har ökat intresset för nya verkansformer. Man kan också tänka sig att använda filament för att skicka flera påföljande pulser efter joniseringen av kanalen för att skada känsliga strukturer som t.ex. bränsletankar och explosivdelar hos robotar. Tekniken för jonisering av luft för att skapa filament beskrivs mer i detalj i avsnitt teknikutveckling.

Icke-dödliga vapen

Användande av laserteknik som ett icke-dödligt vapen har diskuterats under en längre tid. Med laserteknik kan man både blända och skada det oskyddade ögat. Enligt Genèvekonventionens protokoll mot icke-humana vapen är det dock inte tillåtet att utnyttja laserteknik för att avsiktligt skada ögonen hos individer. System avsedda för bländning inkluderas inte i avtalet och kan därför användas som ett icke-dödligt vapen. Tillämpningar där bländning av ögat är av intresse inkluderar t.ex. optikspaning, optiska sikten på fordon, optiskt styrda robotar etc. Civila tillämpningar har också diskuterats där ett lasersystem avsett för bländning kan användas för att kontrollera stora folkgrupper. Ett

problem relaterat till bländning med laser är att anpassa nivån så att ögonskada inte uppstår. Eftersom effekten av bländning varierar kraftigt beroende på bakgrundsljuset (t.ex. dag/natt) är det svårt att anpassa lasereffekten för att täcka in många scenarion. I den här rapporten inkluderas inte bländning av ögat i olika scenarion som en del av ett laservapensystem och utlämnas följaktligen i den fortsatta diskussionen.

Det internationella utvecklingsläget

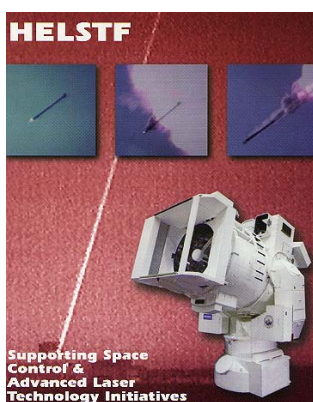
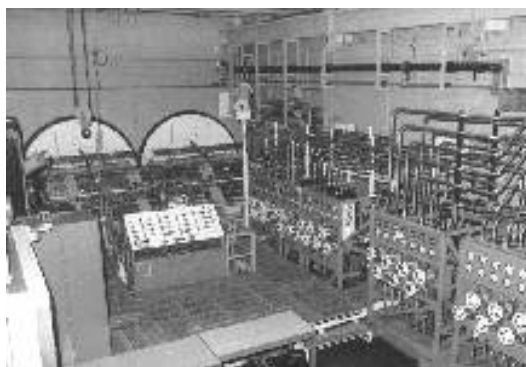
Taktiska laservapen-ex. på utveckling under 1970-1995

Högenergilaser för vapentillämpningar har studerats sedan 70-talet. Historik kring laservapenutvecklingen finns väl beskriven i böcker av Hecht[28] samt Anderberg/Wohlbarsht²⁰. Speciellt var det CO₂-laser som första gången möjliggjorde lasrar med effekter i 100 kW-klassen. En gasdynamisk CO₂-laser med denna uteffekt konstruerades av AVCO redan 1971. År 1973 demonstrerades nedskjutning av förlöslösa flygplan och 1975 hade amerikanska armén monterat en 30 kW laser i en personbandvagn (MTU = "Mobile Test Unit") och demonstrerat nedskjutning av en helikopter. Tillförlitligheten hos laser- och följesystemet var förmodligen sådant att man inte bedömde det som kostnadseffektivt med en vidareutveckling.

Amerikanska flottan demonstrerade laservapen i klassen 400 kW under ett markbaserat prov 1978 där TOW-robotar sköts ned. Systemet innehöll en kemisk laser som utvecklats av TRW. Utvecklingen fortsatte sedan i programmet "Sea-Lite" där TRW utvecklade det som länge uppgetts vara världens kraftfullaste laser, MIRACL ("Medium-Infrared Advanced Chemical Laser"). MIRACL arbetar inom våglängdsbandet 3,8-4,1 μm och kan leverera effekter av storleksordningen 2 MW kontinuerligt under 70 sekunder. Strålen har en utsträckning av 3*21 cm i kaviteten innan den omformas till en cirkulär stråle med 14 cm diameter. Därefter kan strålen fokuseras med ett teleskop med 1,8 meters diameter. Projektet Sea-Lite transformerades till "High Energy Laser Systems Test Facility" (HELSTF) som nu används för olika laservapenstudier för hela det amerikanska försvaret. Figur 16 visar HELSTF anläggningen och Figur 17 visar teleskop och laser vid HELSTF.



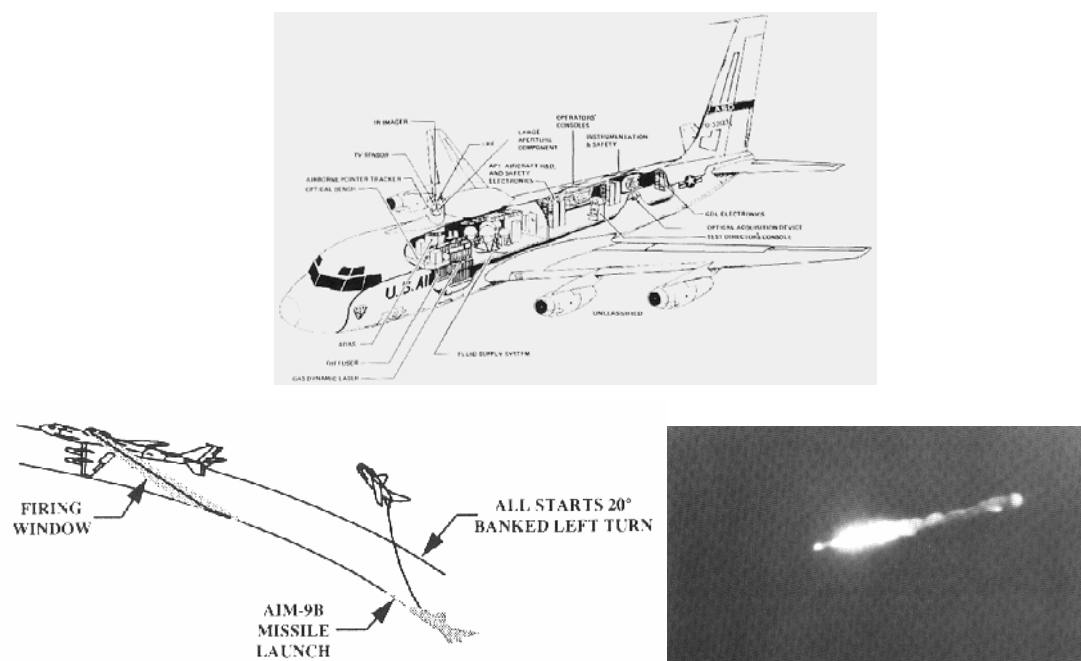
Figur 16. HELSTF anläggning i White Sands USA.



Figur 17. Laser (överst) Sea-Lite Beam Director nu ingående i HELSTF , High Energy Laser Systems Test Facility, i White Sands USA. Sårbarhetstest vid laserverkan mot en trycksatt ICBM efterliknande yttre påverkan som uppstår vid uppskjutningsfas(nedre figurer). Ref. se Internet och HELSTF.

Inom Amerikanska flygvapnet tog man under 70-talet kraftfulla initiativ till att demonstrera flygburna laservapen. Under namnet ALL ("Airborne Laser Laboratory") installerades under 80-talet en 400 kW gasdynamisk CO₂-laser i ett militärt transportplan typ KC-135. Hela programmet finns detaljerat beskrivet i en nyutkommen bok som heter "Airborne Laser- Bullets of light" av Robert Duffner²¹. Man lyckades 1983 skjuta ned 5 st Sidewinder-robotar (AIM-9B) i följd på ett avstånd av 3-5 km. Robotarna avfyrades på 7 km avstånd och på ca. 3-5 km höjd. Den har en hastighet på knappt 1000 m/s. Efter målfångning på ca 5 km avstånd lyckades man på ca 3 km avstånd placera den 14 cm breda strålen på robotdomen (om vi ansätter följnoggrannhet motsvarande 3 cm innebär detta en följnoggrannhet som är bättre än 10 μ rad). Under en tid mellan 2-5 sekunder levererades lasereffekten 75 kW, motsvarande en effekttäthet på ca 5 kW/cm² och en energideposition mellan 10-25 kJ/cm². Enligt uppgift i Duffner's bok skulle 20 kW på målet ha räckt till destruktion (skadenivån för robotdomen uppskattas till 2.7–6.7 kJ/cm²).

Programmet ALL avslutades med nedskjutning av 3 st. obemannade droner i ett marint scenario där dronen skulle simulera ett kryssningsrobotanfall mot ett fartyg. Dronen flög på ca. 30 meters höjd och bekämpades med ALL-lasern på ett avstånd av ca 2 km. Följesystemet i ALL-lasern innefattade IR-kamera, TV och laseravståndsmätare. Förföljningen skedde genom låsning på den från målet reflekterade strålen via en spiralavsökning på 10 Hz med en öppningsvinkel på 300 μ rad. Figur 18 visar ALL-systemet.



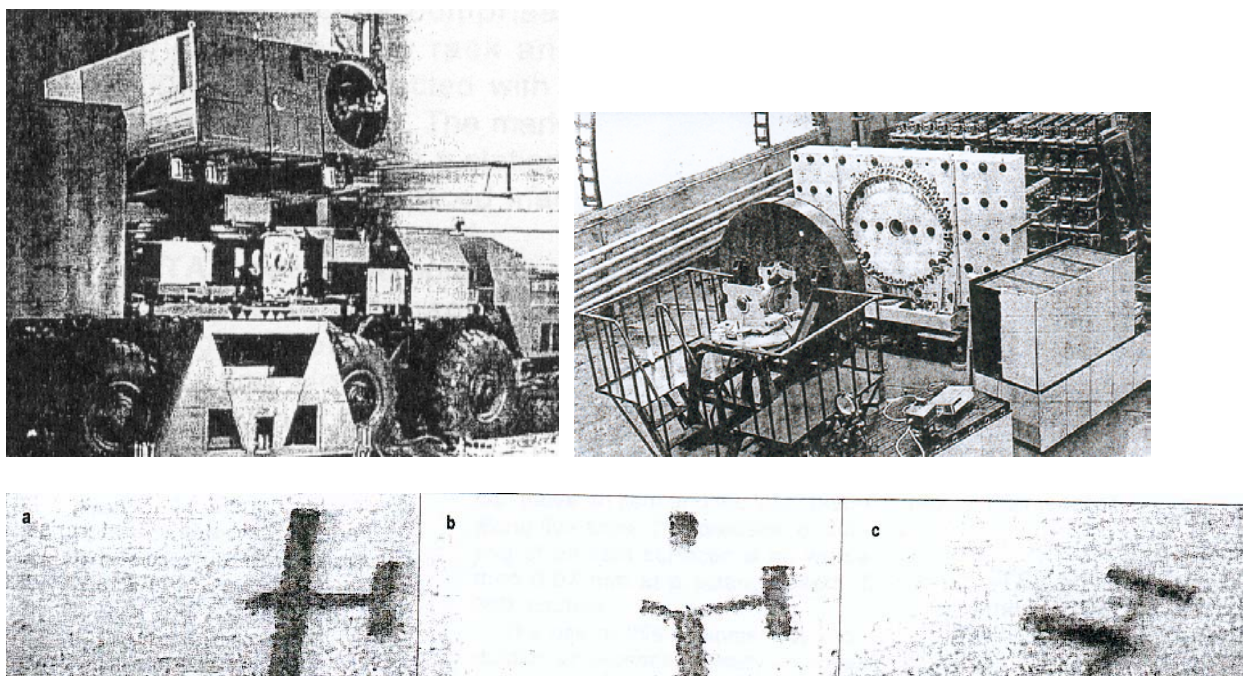
Figur 18. ALL, "Airborne Laser Laboratory" som hyste en 400 kW CO₂-laser och 1983 demonstrerade nedskjutning av jaktroboten Sidewinder samt obemannade flygplan. Övre bilden visar systemet och de undre bilderna scenariot samt en TV-registrering av den laserbekämpade roboten. Källa: Duffner (ref. 21).

I Tyskland pågick under 1980 och början av 1990-talet ett projekt som kallades HELEX, vilket syftade till att demonstrera ett mobilt laservapen monterat i ett stridsvagnschassi. En gasdynamisk CO₂-laser skulle bekämpa helikoptrar via frostning av huven (vilket kräver ca. 10 J/cm², innebärande att en meterstor yta skulle behöva exponeras). Andra luftmål kräver betydligt större fokusering för att uppnå tillräckliga skadenivåer. Spegeldimensioner kring 1 meter (teleskop) och lasereffekter kring 1 MW behövs för att uppnå verkansavstånd mellan 5-10 km vid 10 µm laservåglängd. Man utvecklade adaptiv optik och utförde en mängd laserutvecklingsarbete innan projektet avbröts förmodligen till följd av järnridåns fall. Figur 19 visar artistens framställning av HELEX i användning.



Figur 19. Det tyska projektet HELEX som avsåg demonstrera ett laservapen med en gasdynamisk CO₂-laser monterat på ett stridsvagnschassi. Uteffekt i området 0,3-3 MW beroende på användning, motsvarande spegeldiameter 0,7-1,5 meter.

Även i det forna Sovjet uppges det att man utvecklade fordonsmonterade laservapen. Det uppgavs även att man skulle ha prövat fartygsburna laservapen för robotskydd. För rymdapplikationer utvecklade det forna Sovjet CO₂-lasrar i MW klassen³. Redan 1982 sköt man ned luftmål med HEL-system. Man har även utvecklat mobila enheter bl. a. baserade på en gasdynamisk CO₂ laser, se Figur 19. Man har hunnit långt avseende adaptiv optik, gasdynamicska lasrar och fastatillståndslasrar för vapenbruk.



Figur 20. Överst t.v. Högenergilasersystem utvecklat vid ALMAZ forskningsinstitut, överst t.h. en "tandem high power solid state laser" från Raduga State Laser Res. and Test Center i Ryssland. Under laser-nedskjutning av testflygplan. Källa Military Parade nov-dec 2001.

Även i Frankrike och Kina har man studerat strukturförstörande laservapen och demonstrationsanläggningar har tagits fram.

Pågående utveckling av taktiska laservapen (2001-03).

Det är troligen endast USA som f.n. har något laservapenprogram av större omfattning, även om Kina nyligen uppgavs satsa medel för utveckling av laservapen för bl.a. satellitbekämpning. Tyskland har ett program för "medium energy" laservapen.

Airborne Laser (USA)

Utvecklingsprojektet ALL som demonstrerade ett flygburet laservapen 1983 har fått en efterföljare som definieras av ett strategiskt behov, nämligen att bekämpa SCUD-missiler och andra ballistiska robotar i deras startfas. Detta projekt kallas ABL, "Airborne Laser" befinner sig 1999 i en projektdefinitionsfas. Projektet syftar till att demonstrera bekämpning av interkontinentala robotar på avstånd upp till 60 mil. Systemet kallas "Attack Laser Aircraft": YAL-1A och man avser att skaffa en flotta på 7st. flygplan av typ Boeing 747. Den ska kunna erbjuda ett fullgott skydd mot (mindre) fiendliga nationers eventuella avsikt att utöva terror genom att avfyra interkontinentala robotar mot USA eller andra näraliggande nationer. Det nuvarande kontraktet som uppgår till 1,3

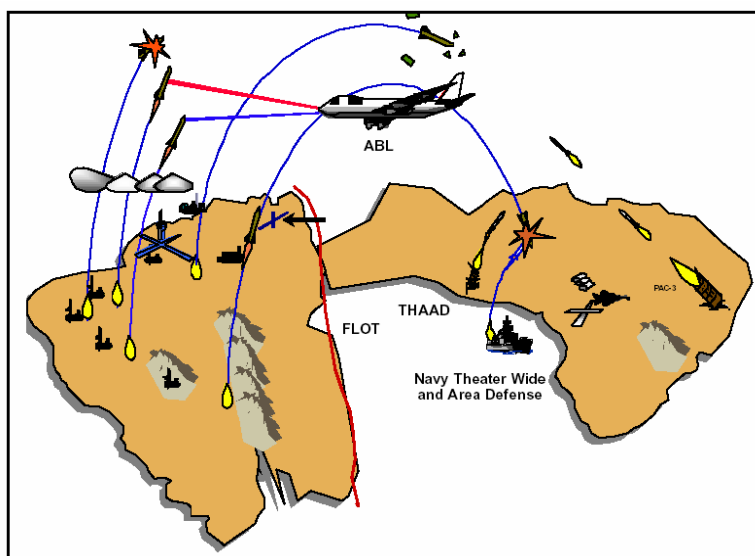
miljard dollar innefattar Boeing (huvudkontraktör), TRW (Numera Northrop Grumman) och Lockheed-Martin. En operativ flotta om 7 flygplan skulle kunna finnas tillverkad omkring år 2010. Kontraktet för den slutliga utvecklingen uppskattas till 4,5 miljarder dollar.

Laserprincipen i ABL baseras på en kemisk reaktion mellan jod och syre och kallas COIL ("Chemical Oxygen Iodine Laser"). Eftersom lasern använder kemisk energi har den hög verkningsgrad. Dess våglängd ($1,315\ \mu\text{m}$) lämpar sig väl ur atmosfärssynpunkt och ger goda möjligheter till fokusering och verkan med rimliga spegeldimensioner.

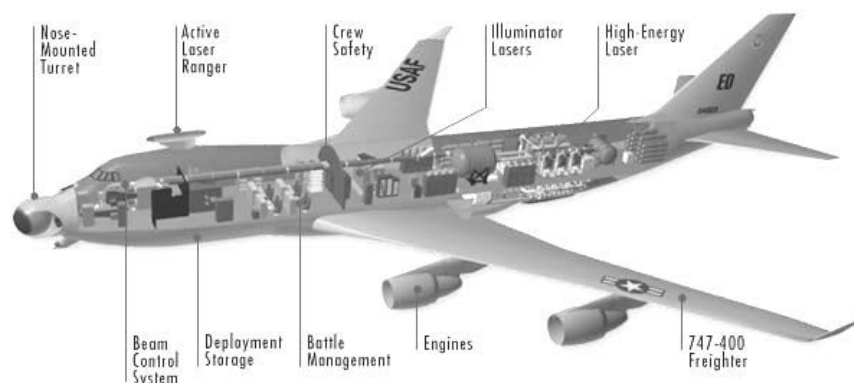
Även om den operativa höjden (10-18000 m) erbjuder klar atmosfär så måste hänsyn tas till atmosfärens turbulens. Det uppges att forskare vid "Massachusetts Institute of Technology" (MIT) och "Air Force Philips Laboratories" har gjort revolutionerande framsteg avseende adaptiv optik och strålkontroll. En deformierbar spegel, vars form kan ändras 100 ggr/sek kompenserar för plattformens och atmosfärens störningar på stråltvärsnittet. Boeing uppges även utveckla en flygburen taktisk version av ABL med en räckvidd på ca 20 km, vilken främst skall skydda mot kryssningsmissiler.

Några intressanta tekniska data för ABL:

- 1.5 meters spegel (teleskop för utgående laserstråle)
- Laserradar och IR för följning, peknoggrannhet i klassen 150 nrad (vilket innebär 9 cm på 60 mil !)
- Man använder 3 lasrar vid sidan av verkanslasern (COIL). En koherent CO₂ för avståndsmätning och hastighetsinmätning, en Nd:YAG laser för precisionsföljning med grindad avbildning och träffpunktsbestämning samt en lågeffekts COIL för korrigering av stråldistorsioner (adaptiv optik).
- 20 skott per magasin
- Kostnad/skott 2000 dollar



Figur 21. ABL:s användningsområde. Från ref. 2.



Figur 22. Schematisk uppbyggnad av ABL-plattformen (källa: Boeing).

”Active Tracker Laser” (ATLAS) utvecklas för att avbilda målet, följa och träffpunktsbestämning. Ett grindat rör från ”Intevac” ingår i systemet liksom en diodpumpad laser med 500 W uteffekt vid 1.06 μm våglängd och en prf på 2.5 kHz.

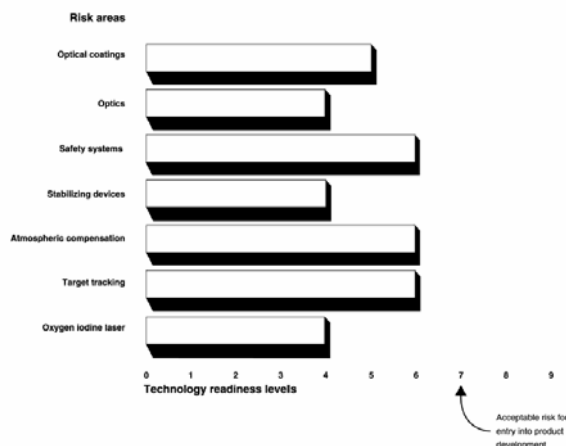
Man nämner ett flertal extra tillämpningar för ABL:

- Spaning och måligenkänning (1,5 meters teleskopet utnyttjas för passiv och aktiv avbildning-upplösning bättre än 1 μrad eller 10 cm på 100 km avstånd).
- Aktiv bekämpning av andra stridsflygplan, kryssningsrobotar etc.
- Förbättra upptäckt av NBC

Utnyttjande av laserstrålen tillsammans med rymdbaserade reläspeglar (system EAGLE= ”Evolutionary Aerospace Global Laser Engagements”) för att utöka täckning och möjliggöra bruten siktlinje.

I en nyligen utgiven rapport från GAO²² (”General Accounting Office”) har man listat tekniknivå för ABL i nuläget.

Figure 2: Current Airborne Laser Technology Readiness Levels



Note: Appendix I contains information describing technology readiness levels.

Source: GAO's analysis.

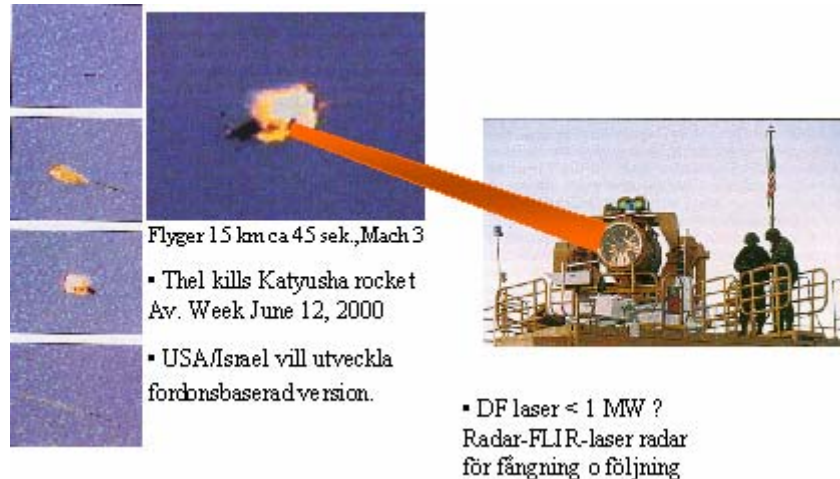
THEL = "Tactical High Energy Laser"

I ett samarbetsprojekt mellan USA och Israel utvecklas fordonsburna eller fasta laservapen för nedskjutning av granater, raketer och andra luftmål (speciellt de 122 mm multipelraketer från som ofta avlossats från södra Libanon mot Israel). Projektet benämns THEL²³ ("Tactical High Energy Laser") avser en avancerad teknikdemonstrator. Systemet baseras på en ny kompakt konstruktion av en DF-laser samt okyld optik. TRW uppger att man klarar upp till 60 skott utan omladdning (anslutning av nya gasbehållare). Den låga kostnaden "\$3000 per kill" skall jämföras med kostnaden för LV-robotar och LV-granater. Ett eventuellt operativt system kräva troligtvis flera samverkande laserenheter för att klara att bekämpa mål från sidan. Detta reducerar problemet med termisk atmosfärsdistorsion genom att lasern hela tiden sveper genom "ny luft".



Figur 23. Det ursprungliga konceptet för THEL ("Tactical High Energy Laser") som utvecklats av Israel tillsammans med USA för försvar av befolkningscentra i Israel mot terrorbeskjutning av artilleriraketer mm. Med spegeldiametern 50 cm och en DF-laser på ca. 0.5 MW uppgavs verkansradien uppgå till maximalt 10 km. Systemet skulle vara stationärt och monteras i containrar. I en vidareutveckling av systemet har man valt en mobil lösning.

Figur 24 visar bilder från den nuvarande stationära THEL-lasern som demonstrerat multipelbekämpning av Katyuscharakterer samt artillerigranater. Israel och USA har kommit överens om utveckling av en fordonsburen THEL kallad MTHEL. Systemet beräknas utvecklat 2008 till en kostnad av ca. 300 Mdollar. Man kommer att förbättra systemet på en mängd punkter bl.a. avseende mobilitet, kompakthet, strålkvalitet, tid för klargörning mm. Figur 25 visar utveckling från ett nuvarande stationärt system till nästa generations trailermonterade version till system som kan monteras i stridsfordon.



Figur 24. Från THEL's nedskjutning av Katyuscha raket juni 2000.

http://www.trw.com/presskits/detailinfo/1%2C%2C2_12^3^12^23%2C00.html

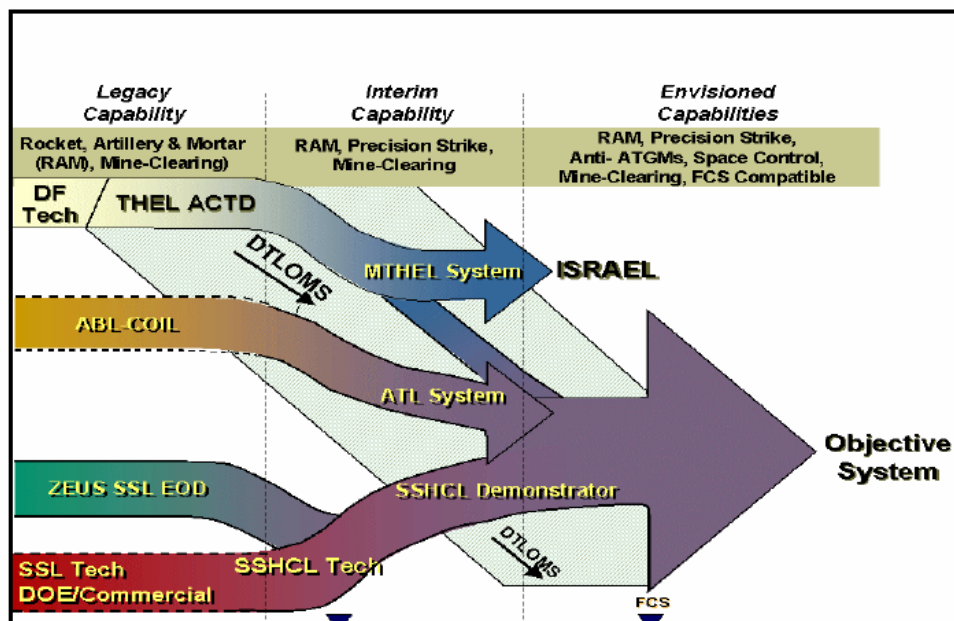


Figur 25. Utveckling av THEL från stationärt till snabbt rörligt system. Ref. 2.

HELSTAR ("High Energy laser System-Tactical Army")

Medan MTHEL baseras på DF-laser har "US Army" ett eget program mot ett mobilt laservapensystem kallad HELSTAR, varav MTHEL är ett ben och det andra innehåller utveckling av andra laserkällor, främst fasta-tillståndslasrar. Idag är det endast COIL och DF laserteknologi som nått de effektnivåer som krävs för ett laservapen. De är emellertid skrymmande och kräver särskild hantering av farliga och giftiga förbränningsprodukter. Emellertid har diodpumpade fastatillståndslasrar (SSL) en större potential att kunna göras kompakta och skalbara till högre effektnivåer. De drivs direkt av elektrisk ström och kan därför försörjas via diesellaggregat och/eller batterier. Forskning krävs för att SSL skal nå vapennivåer och nödvändig verkningsgrad (se avsnitt nedan). I HELSTAR ingår även en aktivitet syftande till bränslegenerering (FRS Fuel Regeneration System) för en elektrokemisk COIL-laser.

I HELSTAR-strategi ingår att man vill utveckla det bästa från alla pågående laservapenprogram för att skapa ett optimalt laservapen för arméns EAAD ("Enhanced Area Air Defense") som syftar till att kombinera laservapen och robotsystem på samma plattform för att kunna försvara sig mot artilleri, raketer, granatkastare och UAV samt även mot attackhelikopter, kryssningsrobotar och flygplan som sluppit igenom andra lager av försvarssystem. Andra tillämpningar inkluderar "special operations", strid i bebyggelse, förstöra reaktivt pansar, förstöra oexploderad ammunition, minkrigsföring, SEAD ("Suppression of enemy air defense") mm.



Figur 26. HELSTAR strategi för utveckling av taktiska laservapen. Ref. 2.

ATL = “Advanced Tactical Laser”

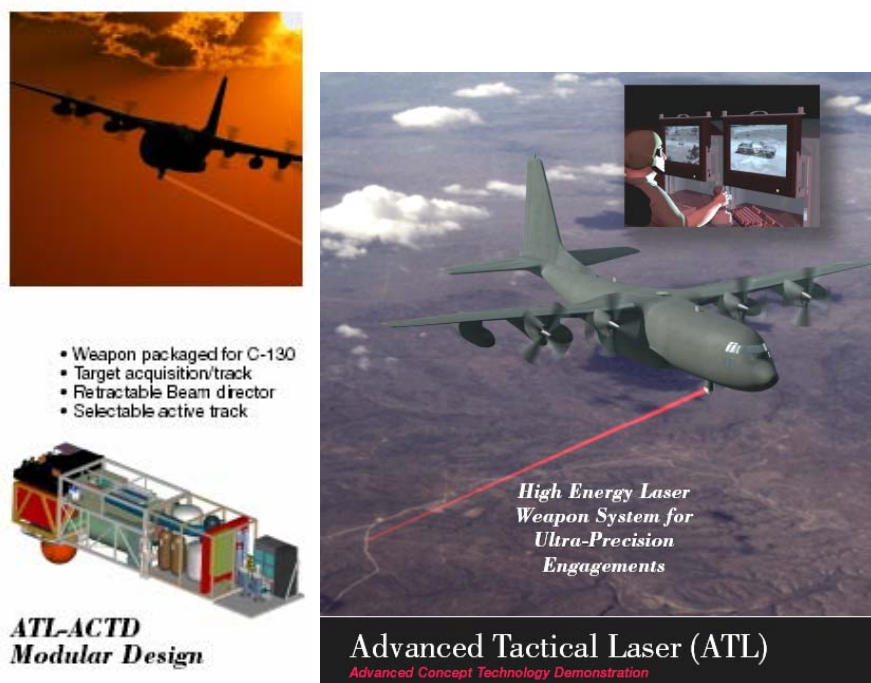
The “Advanced Tactical Laser” (ATL) är ett koncept för laservapen som sedan 2001 är en 4-års ACTD (“Advanced Concept Demonstrator”). Denna familj av vapen skall bygga på modultanken och kunna anpassas till olika plattformar från fordon till helikopter och flygplan. Man lånar teknologi bl.a. från ABL-programmet. Man avser att från 5-10 km avstånd kunna punktbekämpa mål ned till en yta motsvarande tvärsnittet av en handboll. Från detta avstånd anser man sig kunna hålla sig utanför räckvidden för handeldvapen eller manburna IR-robotar (“manpads”). Strålen är tyst och osynlig även på natten. Man kan t.ex. förstöra elledningar och transformatorer, radarantennar, radio-,TV- och kommunikationsantennar, stoppa fordon t.ex. via punktering av däck etc. Effektnivån för denna typ av operationer är 20-50 kW beroende på verkansavstånd.

Om man ökar effekten till 100 kW eller mer kan man tänka sig försvar av fartyg mot krysningsrobotanfall från en flygburen plattform, därigenom undvikande det ur atmosfärstransmissionens synpunkt besvärliga skiktet nära havsytan samt ”head-on”-problemet som beskrivs längre fram.



Figur 27. *Advanced Tactical Laser (ATL). Från ref. 2.*

ATL laser baseras på Boeings syre-jod laser (COIL) som idag ger ca 20 kW. Man avser att undersöka ett helt slutet bränsleåtervinningssystem. Man utesluter inte att man ersätter COIL-lasern med en fastatillståndslaser i ett operativt skede. Olika plattformar studeras som C-130, CH-53, CH-47 och MV-22.



Figur 28. Nuvarande ACTD program för ATL är inriktat på montering i en "gun-ship" C 130 för "kirurgiska ingrepp". Programmet leds av United States Special Operations Command (USSOCOM) vid MacDill AFB, FL. Den flygoperativa delen leds av Air Force Special Operations Command, a component of USSOCOM vid Hurlburt Field, FL. The ATL-programmet stöds av ett antal andra organisationer (U. S. Army Space and Missile Defense Command, U. S. Air Force Research Laboratory, Air Force 45th Test Wing, Army's White Sands Missile Range, Marine Corps, Joint Non Lethal Weapons Directorate och Lincoln Laboratory).

Riskfaktorer för ATL

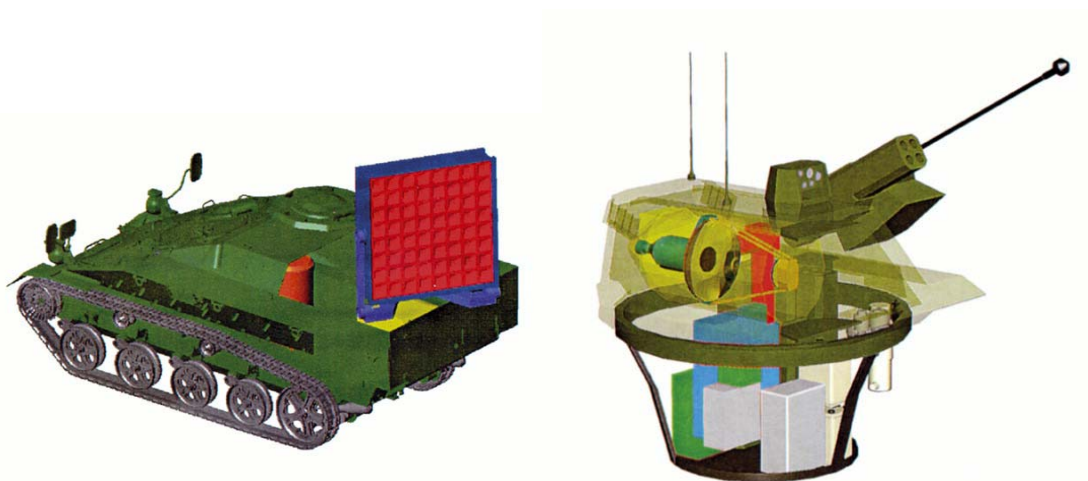
De stora stötestenarna för ATL bedöms vara laserkällan samt strålkontroll i den relativt turbulenta omgivning som ATL skall verka. Ett annat problem målidentifiering och träffpunktsval för den klottriga omgivning som t.ex. en urban miljö kan innebära. Aero-optiska effekter som uppstår runt rotorerna och flygplanskroppar är andra källor som kan reducera strålkvaliteten.

Laservapen i Tyskland

"Rheinmetall Weapons and Munitions" (Rheinmetall W&M) har nyligen avslöjat ett fordonsprogram för strålvapen²⁴. En prototyp kan vara klar 2006. Man motiverar satsningen bl.a. genom behovet av icke-letala vapen för urban miljö. Man diskuterar att använda en MEL (Medium Energy Laser) i området 10-100 kW för att bekämpa bl.a. optiska sensorer i UAV, robotar, sikten etc. Man nämner även att lasern kan användas för "intelligence image system to detect and lock on optic part of hostile platforms". Adaptiv för strålkontroll har också studerats.

Man utvecklar både pulssade gas och fastatillståndslasrar. De tillämpningar som nämns är:

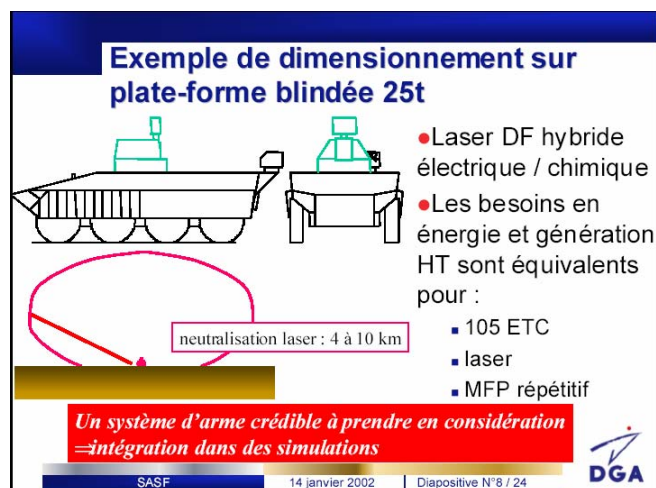
- Bekämpning av UAV-speciellt sensorer
- Strid i bebyggelse-punktinsatser
- EO-sensorer i robotar och sikten
- Stridsvagns VMS-system som det ryska Shtora.



Figur 29. Rheinmetalls koncept för ett kombinerat laser och HPM vapensystem speciellt avsett för strid i bebyggelse. Källa Janes/Rheinmetall.

Frankrike

Frankrike har samarbetat med Tyskland inom laserområdet. Tidigare hade man en försöksutrustning som hette LATEX („Laser Associe a une Tourelle Experimentale”) troligen en 10-100 kW utvecklad för ”General Delegation for Armament” (DGA). Det är inte offentligt vad deras eventuella nuvarande laservapenprogram innehåller. Nedanstående OH-bilder presenterades nyligen av DGA vid en internationell konferens (OPTRO 2002 i Paris).



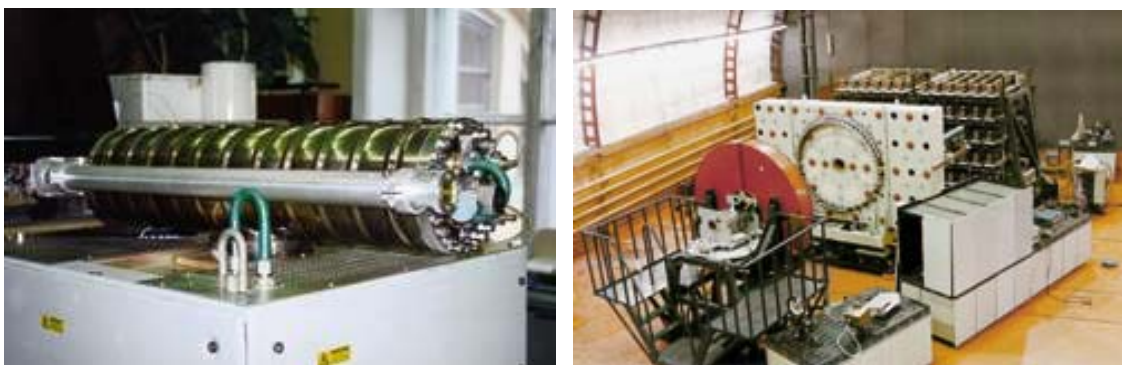
Figur 30. DGA bilder från konferensen OPTRO 2002 avseende laservapen.

Ryssland

Inget är känt om eventuella pågående laservapenprogram i Ryssland. Ryssland har dock utmärkta laserfysiker och gör stora insatser inom laserområdet. En genomgång av rysk laserteknik återfinnes bl.a. i "Military Parade", 2001, nr. 48²⁵. Nedan visas några bilder som kan illustrera den ryska potentialen avseende laservapen.



Figur 31. Exempel på "first-generation optical countermeasures laser system" utvecklat av Granat Design Bureau, Ryssland. http://www.milparade.com/2001/48/03_05.shtml. Enligt uppgift kan utrustningen avge pulser med 2000 J pulsenergi-en puls som om den kan sändas med 10 Hz eller med närmar sig den allmändetråkuktiva laservapennivån.



Figur 32. T.v. en högenergilaser utvecklad vid "The Research Institute for Laser Physics / Vavilov State Optical Institute" och t.h. en "Tandem high-power multichannel solid-state laser facility"-unik i världen enligt Raduga State Laser Research and Test Center

Några av de mer framstående ryska laserinstituten med kompetens för laservapen kan utläsas från "Military Parade", 2001, nr. 48²⁶. Vi citerar:

- "The Research Institute for Laser Physics was established in 1993 from a research division of the Vavilov State Optical Institute. Currently, the institute employs 155 people, including 9 Doctors and 53 Candidates of Science. The institute is involved in the development of diode-pumped solid-state lasers (eye-safe lasers, high stable lasers, high-power and short-pulsed lasers); gas lasers (CO₂ lasers, iodine lasers); research in dynamic correlation of aberrations in lasers and optical systems (nonlinear optical correction, phase conjugation mirrors, aberration correction in observation optical systems); laser radiation propagation over large distances; and fundamental study of bistable systems"
- "The Almaz Research and Production Association, established in the late 40s, is currently a recognized leader in national AD systems development. The association boasts more than 30-year

experience in building laser energy transmission systems and its components intended for generation, formation and aiming of a powerful laser beam on remote objects. This article is actually the first publication of some of the association's latest developments in this sphere."

- *"For 30 years now, the Raduga State Laser Research and Test Center of the Russian Federation has been involved in experimental development of laser systems and complexes, including high-power laser facilities, mobile lasers systems, high-precision optical systems, as well as a number of experimental auxiliary and support systems. Over these years, this unique production and social complex has evolved into the Closed Administrative and Territorial Formation (the town of Raduzhny) located in central Russia near Vladimir. For 30 years now, the Raduga State Laser Research and Test Center of the Russian Federation has been involved in experimental development of laser systems and complexes, including high-power laser facilities, mobile lasers systems, high-precision optical systems, as well as a number of experimental auxiliary and support systems. Over these years, this unique production and social complex has evolved into the Closed Administrative and Territorial Formation (the town of Raduzhny) located in central Russia near Vladimir."*

För att återta något den förmåga inom laserområdet som till delar förlorats sedan Sovjetunionen upphörde avser Ryssland att samordna och stärka civila och militära insatser inom laserområdet med ett nationellt 4-årigt program. Inget är känt om omfattning och inriktning av denna satsning.

Kina

Kina uppges²⁷ utveckla antisatellitlaservapen för att kunna blockera USA:s spaningssatelliter och kommunikationssatelliter i händelse av konflikt t.ex. med Taiwan. Kina har utvecklat en korthållslaser för att förstöra optiska sensorer (ZM 87).

Kina uppges även framgångsrikt ha skjutit ned inkommande kryssningsmissiler med laservapen vid prov i Qinghai och Tibet i augusti 1999, juni 2000 och under 2001. Enligt medier i Hong Kong, juni 2000, så utvecklar man detta s.k. "death ray artillery". Det systemet listades som ett "National Security Project" troligen innebärande en stor budget.

Man har även startat ett program för flyg och rymdbaserade laservapen. I den första fasen skall man installera laservapen i en flygburen plattform (jfr. ABL). I den andra skall man placera laservapen i ett mer avancerat flygplan för att i en tredje fas överväga placering iUCAV och/eller i en rymdplattform.

Kina uppges få mycket laserteknologi från Ryssland och ett samarbetsavtal inom laservapenområdet uppges ha slutits under juni 1999.

Storbritannien

Storbritannien har mycket god kompetens inom en rad relevanta områden för laservapen inkluderande DIRCM ("Directed Infrared Countermeasures"), adaptiv optik, diodpumpade fasta tillståndslasrar, fiberlaser, icke-mekanisk strålstyrning mm. För nuvarande är det inte känt om man har något pågående laservapenprogram.

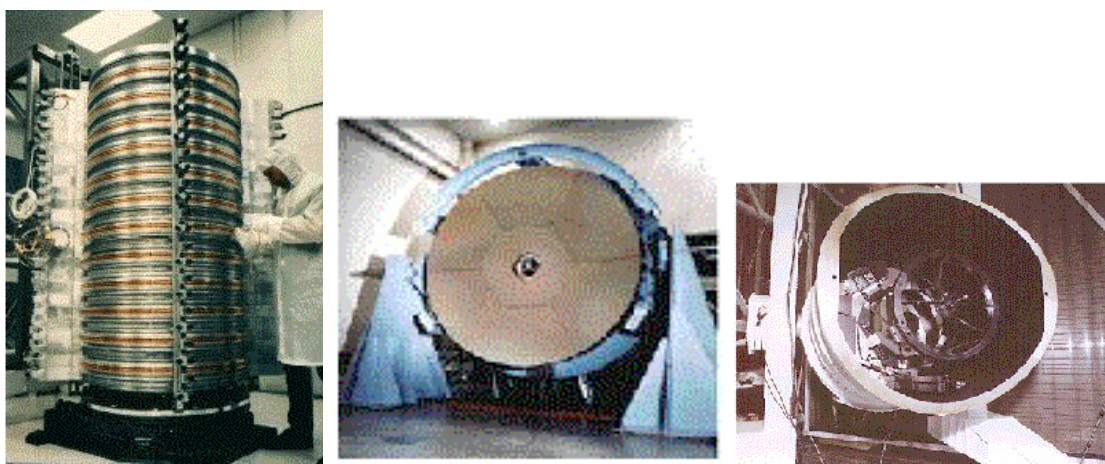
Strategiska ervapen.

Bekämpning av mål baserade i rymden lämpar sig väl för laservapen eftersom problemet med strålutbredning i atmosfären till stora delar elimineras. Följande strategiska laservapentillämpningar har diskuterats i öppen litteratur^{28,2}. Systemen har huvudsakligen studerats i USA.

1/ Rymdbaserad laservapen ("Space Based Laser SBL")

En sådan laser skulle kunna bekämpa ICBM (både i start och nedåtgående fas), satelliter, strategiskt flyg, antisatellitmissiler etc. Högenkilasrar i klassen 10 MW eller mer torde krävas för denna tillämpning. Spegeldiametrar omkring 10 m är nödvändiga och de bör vara lätta för att kunna transporteras upp i rymden utan alltför stora kostnader.

ICBM bör om möjligt bekämpas i startfasen när de är mest sårbara. Eftersom denna fas endast pågår under ca. 60 sekunder krävs en automatiserad stridsledning. Inriktningssystemet måste ha extrem precision eftersom vi talar om bekämpningsavstånd på 1000 km eller mer. Det kan noteras att "US Air Force Philips Labs" har demonstrerat inriktnings- och följnoggrannheter i storleksordningen 40 nrad (vilket innebär 10 cm på 250 mil!). Man förutser att placera ut många system på ca. 1300 km höjd och med en omloppstid på 2 timmar, för att få ett heltäckande skydd mot ett större antal avfytrade ICBM.

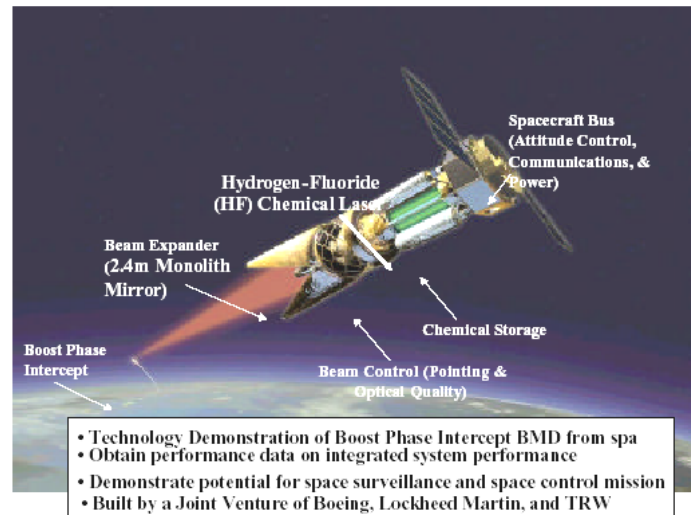


Figur 33. Översta raden, del av munstycke för den s.k. Alfa lasern, en 4 meters spegel (LAMP), samt ett teleskop som skall användas i ett experimentet för ballongburen följning och belysning av autentiska ballistiska robotar.

I framtida planer ingår att 2012 demonstrera ett laservapen i rymden. Om detta går bra planeras ett 20-tal laserstationer som skall belysa robotar under 1-10 sekunder beroende på avstånd. Målväxlingstiden uppges att vara så kort som 0.5 sekunder. Man uppskattar att 12 lasersatelliter kan förhindra 94 % av alla ballistiska robotanfall mot USA. En rymdbaserad laser kan attackera högt flygande flygplan (10 km eller mer) eftersom atmosfären är tunn och inte nämnvärt distorderar laserstrålen. Det fientliga flygplanet detekteras och följs med IR- eller radarsensorer. Den energi som krävs för att bekämpa flygplanet torde vara avsevärt lägre än för ICBM pga. att målet är så mycket långsammare, vilket medger längre bekämpningstider. Systemet med SBL förväntas bli operativt efter 2020.

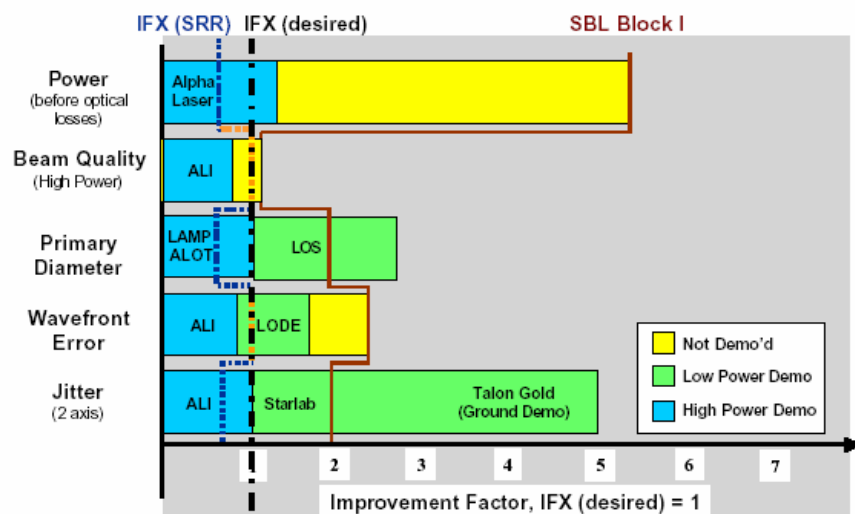
Nästa milstolpe är IFX experimentet ("the Integrated Flight Experiment") som ska demonstrera möjligheten att förstöra en missil i uppskjutningsfasen. Ett sådant experiment förväntas även stödja spaning och inmätning av andra mål, t.ex. strategiskt bombflyg, andra rymdmål, etc.

SBL IFX inkluderar en HF laser i MW-klass samt en 2-4 meters utgångsspegel. Man har demonstrerat många prestandakrav för IFX på marken (se Figur 35,36) men inte varit nära de operativa kraven, speciellt avseende lasereffekt eller mer adekvat nödvändig intensitet vid målet.



Source: SBL Program Office

Figur 34. *Space Based Laser , SNL. Källa ref. 2.*



Source: BMDO

Figur 35. Uppnådda och önskade prestanda för rymdbaserad laser. Från ref. 2.

	Subsystem SOA	Integration IFX System	Threshold System	Advanced Concept System	Technology Goal System
Wavelength (μ)	2.70	2.70	2.70	2.70	1.35
Power (PO)	1	0.67	6.5	10	6.5
Diameter (m)	4	2.4	8	10	8
Jitter (AE)	3.33	1	0.4	0.33	0.17
Wavefront Error (WFE) (WE)	2	1	0.63	0.45	0.2
Brightness (BR)	3×10^4	0.01	1.50	4.10	8.10

Significant performance increases are needed in all technologies

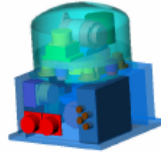
- From current state-of-the-art (SOA) to IFX
- And from IFX to Operational System

Source: BMDO

Figur 36. Uppnådda och önskade prestanda för rymdbaserad laser. Från ref. 2.



- Circa 1990, SDIO/HABE/SBL program: Draper Labs
- Demonstrated LOS stability of $\ll 50$ nanoradians (nr)
- Very benign environment (isolated lab with simulated space craft "vibration loads")



- SVS SIMMS Tactical IRU demonstrated, 1μ r
- ATA Tactical IRU developed under SBIR
- Lockheed's IRU for ABL delivery due in February, 2001, with approximately 150 nr line of sight stability required

Inertial Reference Unit State of the Art

- Existing inertial instruments can meet IFX needs but not operational needs
- Fiber-optic gyros show promise for future
- No inertial instrument development programs exist which support large-aperture precision pointing requirements

Source: SBL Program Office

Figur 37. Exempel på uppnådd linjestabilisering med tröghetsplattformer. Från ref. 2.

2/ Markbaserat antisatellit (ASAT) vapen. GBL = "Ground based laser".

Satelliter är relativt mjuka mål (solceller, sensorer etc. med skadenivåer i klassen 1-10 W/cm² räknat framför målet). Ett effektivt markbaserat laservapen för satellitbekämpning skulle behöva utplaceras på flera högt placerade platser runt jorden för att få en god tillgänglighet ur vädersynpunkt. Reläspegel i rymden skulle utöka förmågan till effektiv bekämpning. Lasrar lämpliga för GBL inkluderar kortvågiga lasrar (1.064 μ m, 1.315 μ m etc.) med liten termisk distorsion. Konceptet anses inte kräva något tekniskt genombrott eftersom nödvändig teknik redan demonstrerats. Införande av ett markbaserat ASAT-vapen skulle emellertid kunna komma i konflikt med internationella överenskommelser (t.ex. "ABM treaty" från 1972). Nuvarande amerikanska program innefattar utveckling av syrejdlasern, adaptiv optik samt en full teknikdemonstration av satellitbekämpning.

I anslutning till rymdbaserade reläspegel kan man tänka sig att tillämpningarna även inkludera laserkommunikation, stridsfältsbelysning eller laserutpekning. Markbaserade lasrar (helst placerade på bergstoppar för att reducera atmosfärsinverkan) har fördelar relativt rymdbaserade lasrar nämligen:

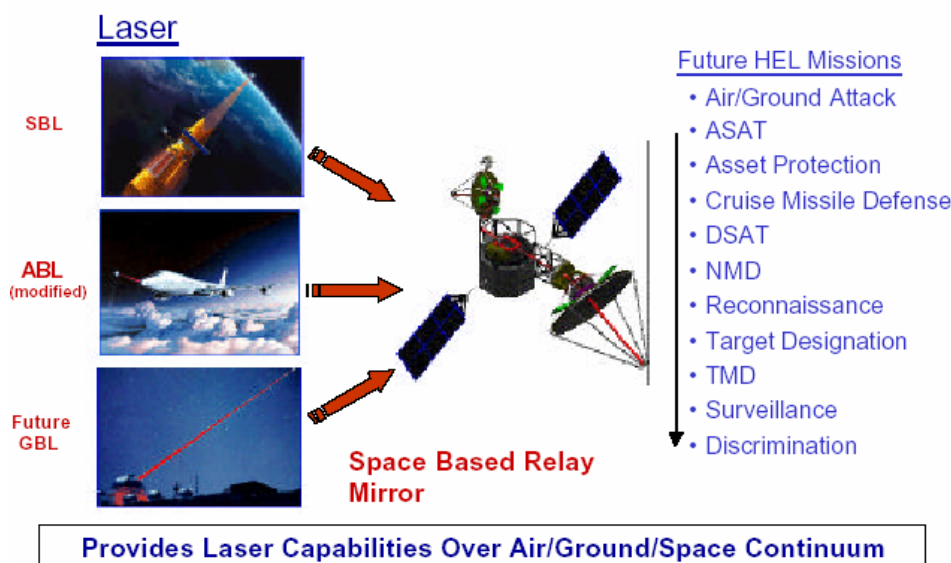
- "Obegränsat magasin"
- Lättare att underhålla
- Liten begränsning i vikt o volym

Bland nackdelarna kan nämnas:

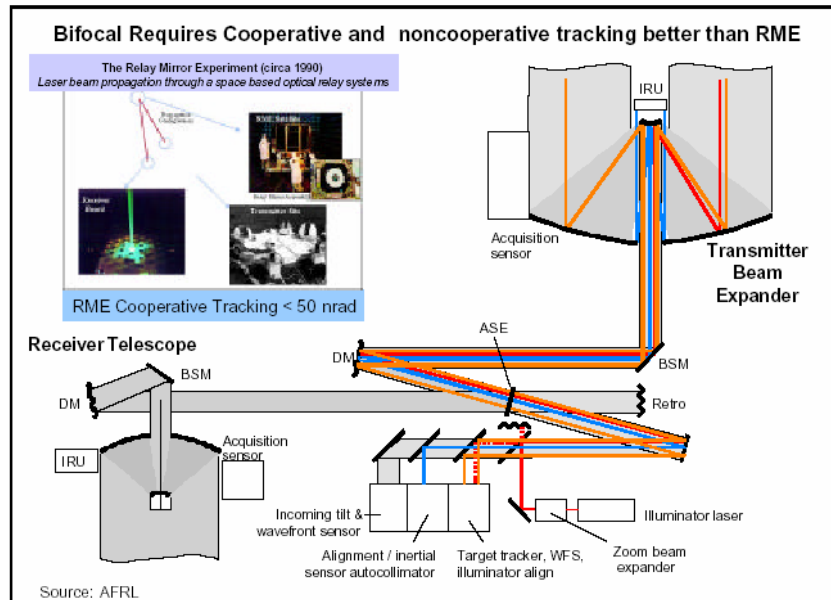
- Strålen måste gå igenom atmosfären med åtföljande begränsningar
- Man behöver (stora) ryddbaserade speglar för att få vinkeltäckning

För låga satelliter (höjder upp till 1000 km) blir räckviddskravet ca 2000 km och med en målirradians på 100 W/cm^2 över 1 m^2 bedöms vara tillräckligt för "kill" inom 10 sekunder. Med $1 \mu\text{m}$ våglängd krävs en spegel på ca 3 meter med förmåga till adaptiv optik. GBL erbjuder även viss förmåga mot geostationära satelliter där ca. 0.5 W/cm^2 ger termisk överbelastning och skada på solpanelerna om de belyses undre ca. 100 sekunder. GBL har naturligtvis stor skadeförmåga mot spaningssatelliter i låga banor.

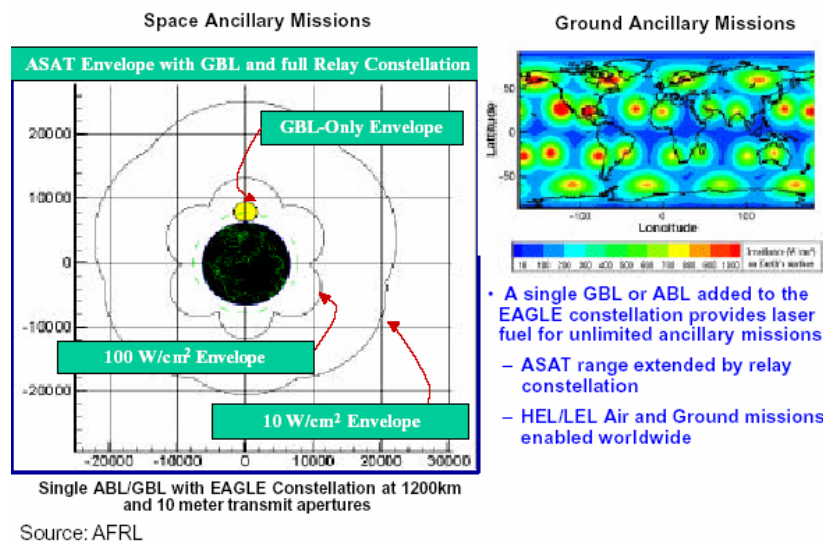
Reläspegel i rymden har tillämpningar för både laservapen och andra lasertillämpningar. Ett koncept benämnes EAGLE = "Evolutionary Aerospace Global Laser Engagement". Exempel på tillämpningar för EAGLE framgår av Figur 38. Figur 39 visar ett tänkt spegelarrangemang inklusive uppnådda prestanda i experiment. Figur 40 visar exempel på täckning och irradiansnivåer uppnåbara med ABL eller GBL och en 10 meter reläspegel.



Figur 38. EAGLE konceptet. Från ref. 2.



Figur 39. Arrangemang för reläspeglar i rymden. Ref. 2.



Figur 40. Utöka täckning med EAGLE konstellation av reläspeglar. Ref. 2.

Tänkbar användning av laservapen i ett svenskt perspektiv

I detta avsnitt skall vi försöka resonera kring vad som skulle kunna komma att bli relevant för det svenska försvaret avseende laservapen. Resonemanget får tas för vad det är dvs. författarna är naturligtvis inte i position att uttala sig för FM räkning. Ingångsvärden för

resonemanget är NBF samt FM:s olika uppgifter i form av internationella operationer, VA och stöd till samhället i kris.

Laservapen kan ses som en naturlig fortsättning av DIRCM-system. Dessa har idag låg effekt och verkar genom störning och vilseledning av EO-sensorer i målsökare och sikten. Nästa steg är att kunna förstöra EO-sensorerna permanent (företrädesvis inom sensorns våglängdsområde det som brukar benämnas, "in-band"). För detta krävs inga större laserenergier. Lasrar med pulsenergier av storleksordningen 0.1-1 J kan räkna om strålkvaliteten är hög. Nästa steg kan vara att skada "out of band" EO-sensorer och radarrobotar via domuppvärmning och negativ påverkan på målsökarsensorn så att låsning omintetgörs. För detta krävs enenrgitåtheter vid målet av storleksordningen mellan 0.1-1 kJ/cm².

Vi ska i detta avsnitt diskutera tre tillämpningsfall:

1/ Fordonsburen LV laser

2/ Fartygssystem

3/ Flygburet laservapen

Diskussionen baseras på att en effektiv laserteknik finns att tillgå för olika effektnivåer samt att adaptiv optik implementerats. Laservapen är inte "ein mädchen fur alles" så det får ses i ett perspektiv av samtidig tillgång till konventionella vapen och andra motmedel som rök, dimma och skenmål. Även HPM kan vara attraktivt för punktmålsförsvar t.ex. på fartyg.

1/ Fordonsburet laservapen

Ett allt ökande hot och problem för konventionellt luftvärn utgör "sent uppdykande" mål som raketer, robotar och granater. Lågt gående kryssningsrobotar liksom från UAV:er med olika uppgifter kommer att utgöra ett ökande inslag i framtida hotbilder. Attackhelikoptern utgör en vapenplattform med allt ökande taktisk betydelse. Den flyger an mycket marknära och döljs därmed av terrängen. Under en kort tid kommer den ovan mask och avfyrar då sina vapen, oftast i form av robotar. Skjutavståndet blir allt längre och kan överstiga 5 km. Under den korta tid som helikoptern eller dess sensorer exponeras eller under transportsträckor är den naturligtvis ett åtråvärt mål för försvararen. Laservapnet skulle ha potential att bekämpa helikoptrar. Notera att bekämpningen inte behöver innebära att kan bränner mål i helikopter kroppen utan det kan räcka med en "mission kill" t.ex. genom att frosta huven eller förstöra sensorerna. Angrepp med flera snabba robotar som dessutom använder hård manövrering kommer att vara mycket svårbekämpade med konventionellt LV men även av ett antirobotsystem.

Man kan tänka sig att ett fordonsmonterat laservapen har två syften - ett defensivt och ett offensivt. Vi har i nedanstående matris försökt att strukturera olika tillämpningar, defensivt eller offensiv förmåga, samt efter FM:s huvuduppgifter. Det framgår från

Tabell 8 att tillämpningarna är relativt mångfacetterade samt att de har relevans för de flesta av FM:s uppgifter.

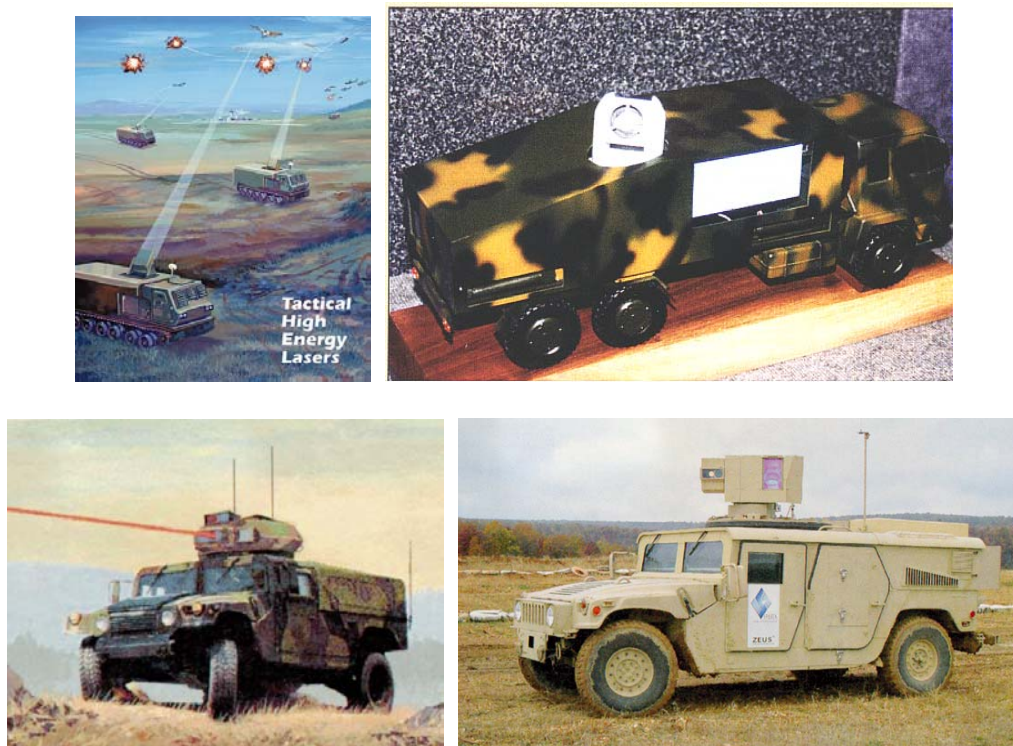
Som bas för antaganden har vi antagit en relativt måttligt räckviddskrav mot robotar och andra mål, dvs. 2-3 km. Det för att vi inte skall landa på ett alltför komplext och stort system. Avsikten är att systemet kan inrymmas i ett stridsfordon, t.ex. stridsfordon 90 chassi eller ett fordon typ HMMW.

Beträffande skadenivåer antas konservativt att $1-10 \text{ kJ/cm}^2$ behövs under 1-2 sekunder. En analys av räckvidder och prestanda görs i appendix 1 där även ett spelkort redovisas. Om vi ansluter oss till en analys vid "Lawrence Livermore" avseende diodpumpade fastatillståndslasrar så skulle ett magasin på 1 MJ vara rimligt. Antal magasin per återuppladdning uppges vara tre dvs. 3 MJ skulle kunna lagras innan en uppladdningsperiod på 30 minuter krävs. Tid för magasinbyte uppges till 120 sekunder.

För att kunna erhålla ett kompakt system tyder mycket på att man idag skulle satsa på diodpumpad Nd:YAG slablasar med $1 \mu\text{m}$ våglängd. Ett alternativ är fiberlaser vid $1.5 \mu\text{m}$. En stor skillnad och fördel med $1.5 \mu\text{m}$ är ögonsäkerheten för reflekterad strålning, speciellt för tredje part. Som diskuteras i appendix så kan ögonsäkerhetsproblematiken för trupp vara reell även från reflekterad strålning. En attraktiv möjlighet är att inkludera andra lasrar med lägre effekt t.ex. en CO_2 laser och en laser vid $3-5 \mu\text{m}$ området för att kunna åstadkomma störning av EO-sensorer. Man kan i framtiden tänkas utnyttja optiskt fasstyrda speglar och då skulle teoretiskt flera lasrar kunna verka samtidigt och i olika riktning. Figur 41 visar tecknarens vision hur fordonsburna laservapen skulle kunna se ut på slagfältet.

Tabell 8. Tänkbara uppgifter för ett fordonsbaserat laservapen.

Tillämpningar	VA	Int. insatser	Skydd till samhället	Kommentar
<i>Defensiva</i>				
Skydd mot robotar, PV vapen, stridsdelar, raketer	1	1	-	Ett laservapenfordon bör skydda flera enheter - relevant för NBF-förmåga.
HKP/attackflyg bekämpning	1	1	0.5 ?	HKP är ett mer relevant mål än attackflyg pga av bekämpningsavståndet. Stoppa "självordbombs" i fpl ?
Stridsfältbelysa	1	1	1	Göra natten till dag genom att utöka kapaciteten för TV och Night vision goggles (NVG).
Långräckviddig måligenkänning	1	1	0.5 ?	Okända flygplan, UAV etc. Utnyttja passiv optik + ev. laserbelysning, speciellt under mörker.
Minröjning, oskadliggörande av oexploderad ammunition	1	1	?	Motiv för laser är snabbhet och precision.
<i>Offensiva</i>				
Bekämpning av UAV	1	1	0.5	Obemannade fpl med sprängmedel kan vara terroristvapen
Hitta och bekämpa optik över stora områden	1	1	?	Om man har tid kan scannande lågeffektssystem med bländförmåga ge liknande effekter. Laservapen medger stora momentana sökområdet samt förstörande verkan på optik.
Punktera däck, på fordon	1	1	1	
Sätta eld på vissa objekt eller del av terräng-röka ut	1	1	1 ?	Motivation för att använda laser för detta är avståndsförmågan, snabbhet, punktbekämpning och överraskning.
Punktbekämpa el- och tele-fonledningar, antenner, etc.	1	1	1	



Figur 41. Exempel på olika fordonskoncept för laservapen. Överst fordon ritade av TRW (numera Boeing) och under t.v. US Armys vision för HELSTAR. Under t.h. ZEUS för oskadliggörande av minor och oexploderad ammunition.

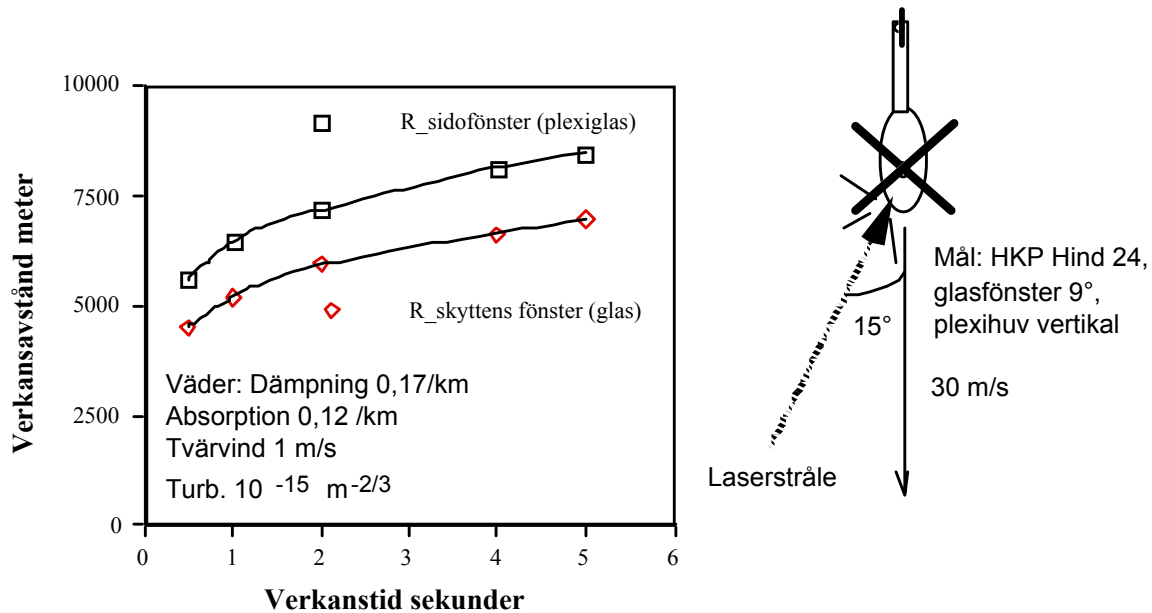
2/ Fartygsbaserat laservapen

Som tidigare diskuteras motiveras i avsnittet marina tillämpningar fyller laservapen en viktig roll för skydd av fartyg främst mot snabba och snabbt manövrerande robotar. Fartyg kommer även att uppträda kustnära, inte minst i internationella operationer vilket adderar en ny hotbild i form av attackvapen, PV vapen etc. För dessa hot sammanfaller i mångt och mycket kraven på ett fordonsmonterat och ett fartygsmonterat laservapen.

Ett fartyg är ett högvärdigt mål som väl kan tänkas utsättas för ett massivt robotanfall som avser att mätta luftförsvaret. Hur många simultana robotar som kan bekämpas beror väsentligen av nödvändig verkanstid i sekunder samt tid för målväxling. För att få en grov uppfattning av detta har vi använt oss av skadedata rapporterade från dåvarande DASA i Tyskland som hade ett laservapenprogram under slutet av åttiotalet. Man studerade ett laservapen för att möta främst helikopterhotet från dåvarande Öst. Studierna baserade på en gasdynamisk CO₂-laser. Denna har en våglängd som är 10 µm är därmed längre än de våglängder som f.n. studeras för ABL och MTHEL m.fl.

Längre våglängd medför större optik för samma fokuseringsförmåga. Vi har använt data från DASA:s broschyrmaterial för att uppskatta verkanstider och verkansavstånd för ett

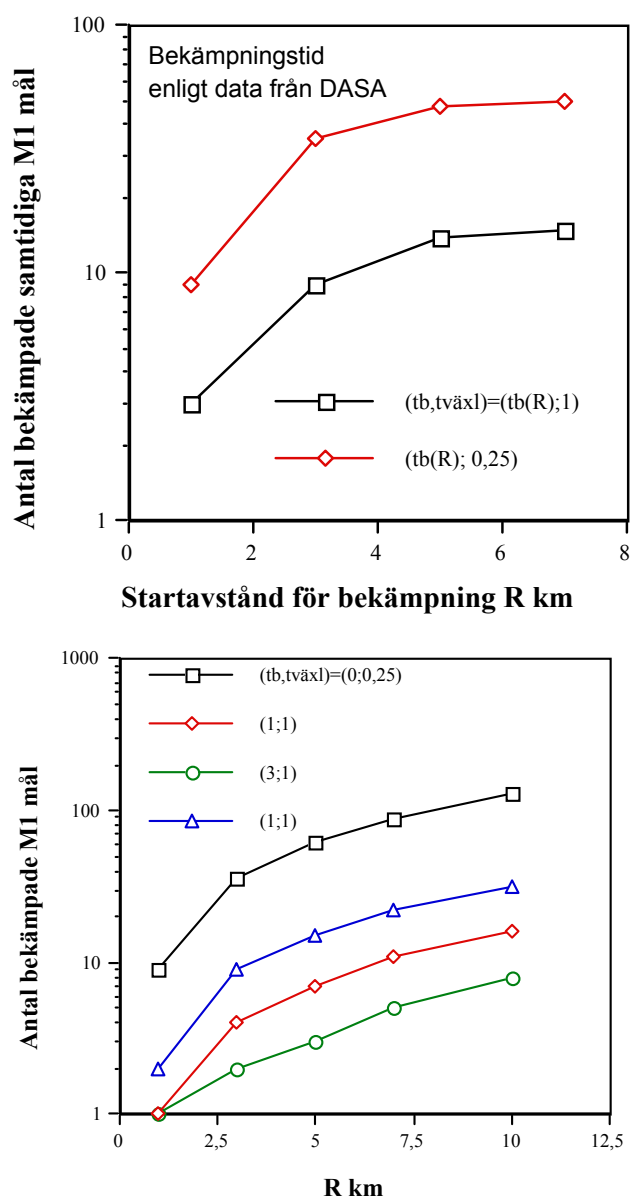
allmändestruktivt laservapen. I Figur 42 visas ett exempel på verkansavstånd som funktion av verkanstid för en CO₂-laser med 300 kW medeleffekt och en utgångsspegel på 0,7 m. Typiska nivåer för förstörande verkan i kompositer, plåt, glas ligger i området 0,1-10 kJ/cm². Vi kan ta resultaten från Figur 42 som en indikation på sambandet verkanstid/räckvidd. I figuren utläses t.ex. att verkansräckvidden är ca 5 km vid 1 sekund och ca. 7,5 km vid 5 sekunders bestrålningstid. Viss reservation tas för att en kortare våglängd har en besvärliga utbredning till följd av turbulens och sikt jämfört med 10.6 µm.



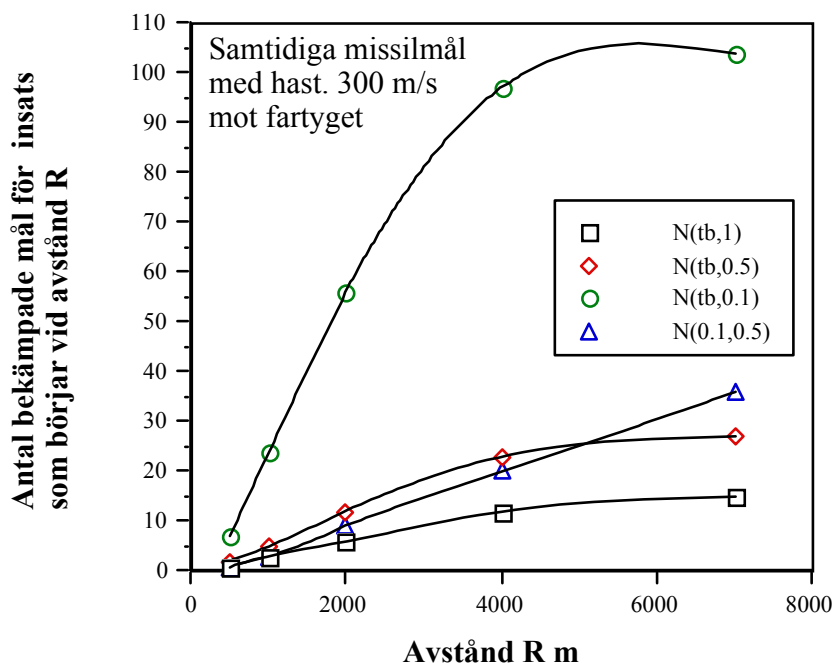
Figur 42. Verkansavstånd som funktion av verkanstid för en CO₂-laser med 300 kW medeleffekt och en utgångsspegel på 0,7 m. Data enligt broschyr från DASA. Data är måhända? representativa för en 300 kW diodpumpad laser vid våglängden 1 µm och verkande mot en radar eller IR robot. I ett sådant system skulle spegeln kunna göras mindre kanske 30-50 cm.

Vi antar för enkelhetens skull N stycken samtidigt inkommande missiler med hastigheten 300 m/s och att vi har en bekämpningstid som funktion av avståndet motsvarande den för glas enligt Figur 42. Vi kan nu beräkna antal bekämpade mål som funktion av startavståndet och målväxlingstiden. Vidare har vi satt en närgräns på 500 meter för effektiv verkan (om roboten är närmare är det stor risk för att den skadar skyddsföremålet). Resultatet framgår av Figur 42. Om vi antar målväxlingstider mellan 0.25-1 sekund (någonstans här torde den under gränsen ligga för en mekaniskt styrd spegel) och bekämpningstider enligt Figur 43 så kan mellan 15-50 samtidigt ankommande M1 mål bekämpas om bekämpningen startar mellan 5-7 km. Om bekämpningstiden antas fix (oberoende av avstånd) så erhålles resultat enligt Figur 44 undre delen. Den fixa bekämpningstiden kan vara representativ för ett störande





Figur 43. Antal bekämpade samtliga M1 mål som funktion av startavstånd för bekämpningen. Olika bekämpningstider och målväxlingstider framgår av figuren.



Figur 44. Antal bekämpade mål för ett laservapen eller en sensorförstörande laser. I beteckningen $N(tb,x)$ avses en bekämpningstid tb som funktion av avståndet enligt den för glas i Figur 42 samt en målväxlingstid x sek.

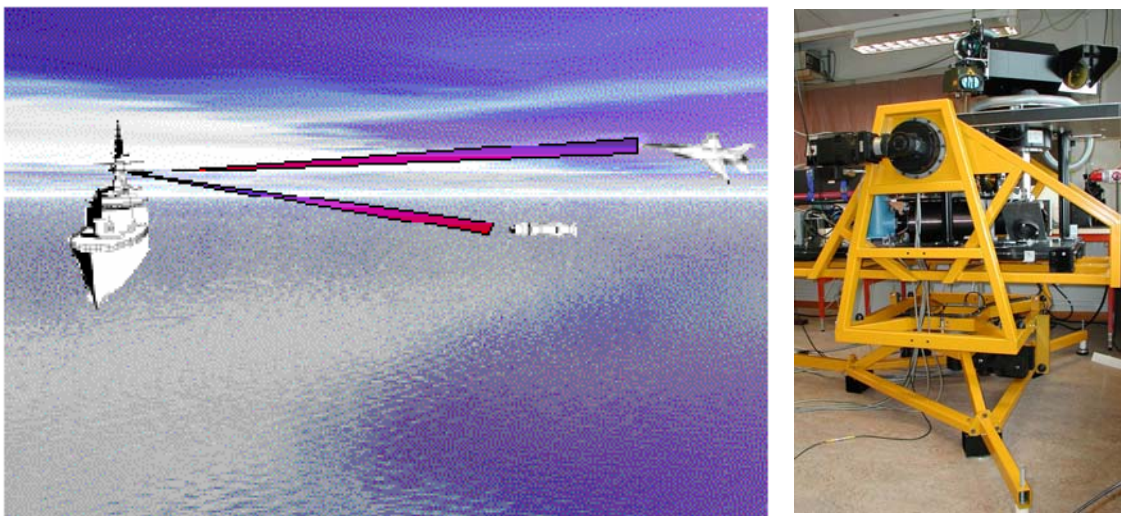
Om målen kommer nära varandra och man har tillgång till en icke-mekanisk strålavlänkning (sådana är undre utveckling) kan man tänka sig en så pass kort målväxlingstid som 0.1 sekunder. I ett sådant fall är bekämpningskapaciteten mycket hög, t ex över 100 mål för en bekämpningsstart vid 4 km eller däröver. Vid en målväxlingstid på 1 sekund är motsvarande antal över 10 mål. Om vi istället antar en fix bekämpningstid (t ex 0,1 sekund för detektorförstörande verkan av pulsad laser) ökar antalet linjärt med avståndet enligt kurvan märkt $N(0.1,0.5)$ med ev. målväxlingstid på 0.5 sekunder.

Ett laservapens stora fördel är den höga kapaciteten för bekämpning av multipelmål (10-100 simultana mål). En möjlighet att påverka både optroniska och radarrobotar indirekt via dompåverkan utan komplett destruktion bör studera vidare.

I tidigare FOI-rapporter^{29,30} har laser och andra skyddsmetoder studerats för skydd av fartyg mot främst attack- och sjömålsrobotar. I detta fall har lasern bara använts för störande eller detektorförstörande verkan "in band". Med ett laservapen får man en mer generell verkansform som även kan användas mot robotar, UAV, attackflyg, helikoptrar samt möjligen även mot "självordsupdrag" som snabba explosivämneslastade båtar.

Erfarenheter av detektion, följning, igenkänning och störning av optiska målsökare har erhållits från LYSA-systemet³² som för nuvarande innehåller en CO₂-laser i 500 W klassen. I LYSA-systemet åstadkommer störning på 10-15 km med en divergens på ca 1 mrad. Med en adaptiv strålkontroll som tillåter dynamisk fokusering skulle denna effekt räcka för att bränna sönder en IR-detektor, i FLIR eller målsökare. Ett kombinerat

laservapen med ingående lågeffekt-laser för störning skulle ytterligare öka skyddsnivån t.ex. i form av verkansavstånd och försäkra om att eventuella störskydd inte skulle få någon effekt när roboten kommer på närmare håll där förstörande verkan skulle ta vid efter ev. misslyckat avhakning. Dessutom erhålles som sagt verkan mot radarstyrda robotar eller robotar utnyttjande semiaktiv styrning eller ledstrålestyrning.



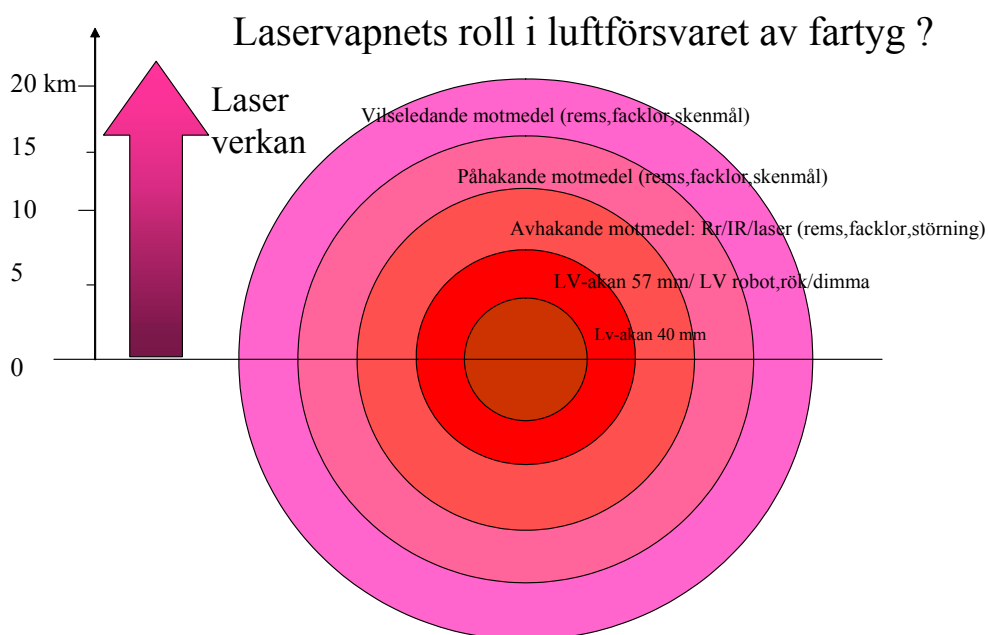
Figur 45. Fartygsburet störsystem, LYSA som studeras vid FOI för bla marina tillämpningar. Mycket av systemkonceptet är tillämbart för laservapen, bla detektion, inriktning och följning³³.

Tabell 9 visar tänkbara fartygstillämpningar. Appendix 2 innehåller ett spelkort för ett fartygssystem.

Ett laservapen på fartyg är främst ett defensivt vapen. Det måste inordnas i ett fartygets totala VMS system. Det är inte självklart hur en laserinsats skall kombineras med andra motåtgärder. Laservapnets fördel med omedelbar verkansmöjlighet efter upptäckt samt möjlighet att verka över stora avstånd bör tillvaratas på samma sätt som man måste beakta dess begränsningar vid dåligt väder.

Tabell 9. Tänkbara uppgifter för ett fartygsbaserat laservapen.

Tillämpningar	VA	Int. insatser	Skydd till samhället	Kommentar
<i>Defensiva</i>				
Skydd mot robotar, PV vapen, stridsdelar, raketer	1	1	-	Ett laservapenfordon bör skydda flera enheter - relevant för NBF-förmåga.
HKP/ attackflyg bekämpning	1	1	?	HKP är ett mer relevant mål än attackflyg pga av bekämpningsavståndet.
Långräckviddig måligenkänning	1	1	0.5 ?	Okända flygplan, UAV etc. Utnyttja passiv optik + ev. laserbelysning, speciellt under mörker.
Stoppa terrorister i snabba båtar	1	1	?	
<i>Offensiva</i>				
Bekämpning av UAV	1	1	0.5	Obemannade fpl med sprängmedel kan vara terroristvapen
Hitta och bekämpa optik över stora områden – t ex vid ingång mot okänd kust.	1	1	?	Om man har tid kan scannande lågeffektssystem med bländförmåga ge liknande effekter. Laservapen medger stora momentana sökområdet samt förstörande verkan på optik.
Sätta eld på vissa objekt eller del av terräng- ”röka ut”	1	1	1 ?	Motivation för att använda laser för detta är avståndsförmågan, snabbhet, punktbekämpning och överraskning.

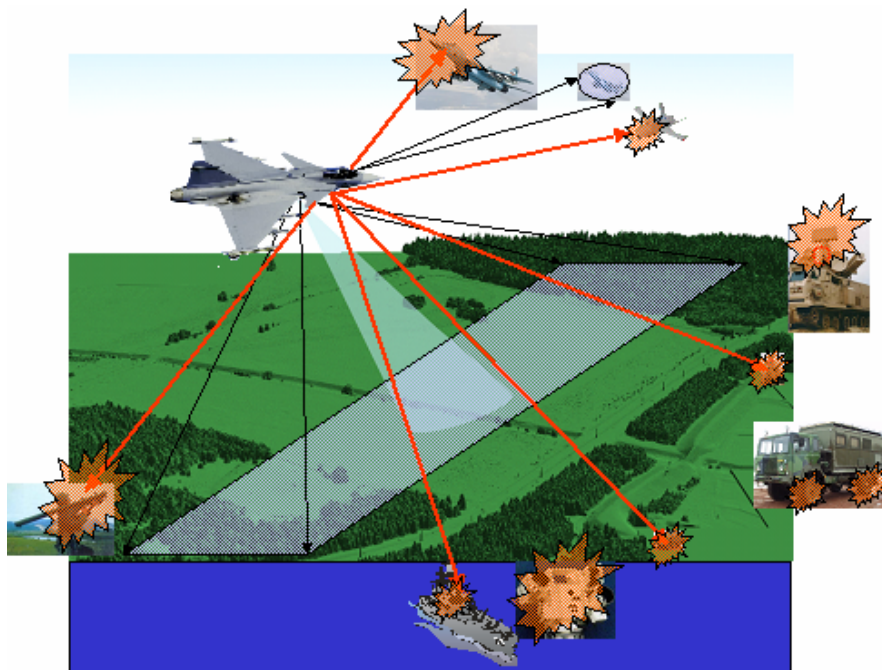


Figur 46. Ett laservapen har potential att klara störning och förstörande verkan över ett stort avståndsintervall som dock är väderberoende. Laservapnet måste integreras i fartygets totala VMS system.

3/ Flygplansbaserat laservapen.

Laser i flygplan, bemannat eller obemannat ger nya möjligheter allt från luftstrid till precisionsbekämpning av mark och sjömål. För stridsflygplan kan systemet lämpligen installeras i en pod eller byggas in i framtida UCAV. Man måste kunna ta ut hög elektrisk effekt (många hundra kW) för att driva direkt eller via batterier. För diodpumpade lasrar krävs ca. 5 V och höga strömmar. Installation i större flygplan typ Hercules eller helikopter ger också möjligheter till precisionsbekämpning kanske företrädesvis mot en tekniskt mer underlägsen motståndare. Se diskussionerna om ATL ovan. Kritik avseende användbarheten av laservapen på flygplan har innefattat väder- och molnbegränsningar. Inom "US Air Force" har man gjort en speciell studie³⁴ för att titta på taktisk användning under olika väderbetingelser. Som diskuterats ovan får man anpassa anfallsprofilen efter vädersituationen, speciellt m.a.p molnsituation. Slutsatsen från studien var att vädret inte utgör någon allvarlig begränsning för HEL på flygplan.

Ett HEL-system på flygplan kan även användas för många andra funktioner än precisionsbekämpning och egenskydd. Hit hör framförallt spaning och identifiering över långa avstånd, större än visuella siktavståndet, samt 3D-avbildning av stora ytor på kort tid. 3 D fokalplansmatriser³⁵ ger nya möjligheter att snabbt generera högupplösta terrängmodeller samt se och identifiera mål i vegetation och kamouflage.



Figur 47. Illustration av potential tillämpningar för HEL på fpl. 3 D avbildning med hög avverkningshastighet, långräckviddig måligenkänning, egenskydd samt punktmålsbekämpning utan kollaterala skada är attraktiva förmågor.

Tabell 10 Tänkbara uppgifter för ett flygplanbaserat laservapen.

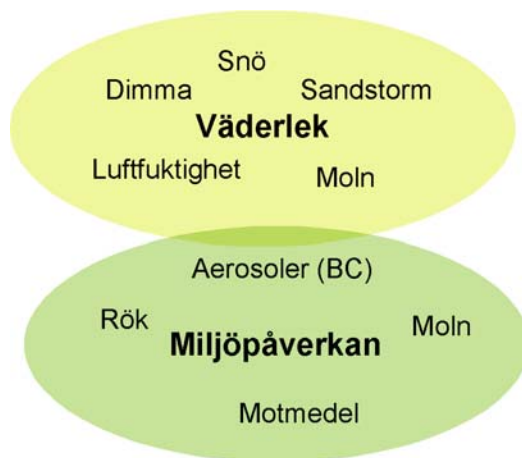
Tillämpningar	VA	Int. insatser	Skydd till samhället	Kommentar
<i>Defensiva</i>				
Skydd mot robotar-egenskydd	1	1	-	Utökad DIRCM funktion mot alla typer av hotrobotar.
Långräckviddig måligenkänning	1	1	0.5 ?	Okända flygplan, UAV etc. Utnyttja passiv optik + ev. laserbelysning, speciellt under mörker.
3 D avbildning över stora områden, kartering, spaning i vegetation—detektera minor på land och i sjö	1	1	1	Kräver att del av laserenergin kan utnyttjas för korta pulser tillsammans med 3 D fokalplanearrayer.
Stridsfältsbelysning	1	1	?	Ger extra belysning för TV och bildförstärkarsystem så att hög upplösning kan utnyttjas på natten.
Bekämpning av andra fpl, hkp i luftstrid	1	1	-	
<i>Offensiva</i>				
Bekämpning av UAV, obemannade modell-fpl, kryssningsrobotar	1	1	0.5	Obemannade modell-fpl med sprängmedel, B C stridsmedel etc. Kan utgöra terroristhot.
Punktbekämpa LV mål	1	1	-	Optik, radarsystem och andra känsliga delar
Punktbekämpa fordon	1	1	0.5	T ex genom att punktera däck, lyktor, bränsletankar, etc.
Förstöra minor och ammunition	1	1	-	
Sätta eld på vissa objekt eller del av terräng- ”röka ut”	1	1	1 ?	Motivation för att använda laser för detta är avståndsförmågan, snabbhet, punktbekämpning och överraskning.

Ett spelkort för ett fartygsbaserat system återfinnes i appendix 3 .

Grundläggande fenomen och begränsningar

En av de stora nackdelarna vid användning av laserteknik är de begränsande effekter som atmosfären kan ge upphov till. Flera olika fysikaliska fenomen kan begränsa räckvidden dramatiskt för ett laservapen. Spridning mot partiklar som är av samma storleksordning som laserstrålningens våglängd orsakar extinktion, dvs. dämpning, vid utbredning i atmosfären. Absorption av strålning genom naturligt förekommande, och även artificiella,

gaser reducerar laserstrålningens intensitet. Turbulenseffekter reducerar också intensiteten hos laserstrålningen vid målet. Termisk uppvärmning av atmosfären (s.k. ”thermal blooming”) där absorption av laserenergi påverkar luftens brytningsindex är en annan effekt som måste beaktas när prestanda hos laservapen bedöms. En annan begränsning är att siktlinjen till målet måste vara fri om inte någon typ av länkspegel används. Molnförekomst begränsar förmågan och tillgängligheten hos ett laser vapen. Exempel på väderleksförhållanden och externa miljöparametrar som kan påverka prestanda hos ett laservapen ges i Figur 48.



Figur 48. *Väderleksförhållanden och miljöpåverkan*

Modeller som beskriver olika vågutbredningsfenomen har nyligen sammanställts i en rapport³⁶. Här finns även utbredningsfenomen och modeller för utbredning av laserstrålning beskrivna.

Atmosfärsutbredning

Vid utbredning av laserstrålar i atmosfären kan effekttätheten kraftigt reduceras om förhållandena är ogynnsamma. Generellt är problemen som besvärligast närmast marken där turbulensen är kraftigast och ett flertal olika aerosoler kan förekomma. För ett rymdbaserat laservapen kan effekter från atmosfären oftast försummas. En av fördelarna att använda ett flygbaserat system som opererar på hög höjd är den minskade påverkan från atmosfäreffekter. Vid studier av system som opererar up till 10 km höjd måste atmosfäreffekter noggrant studeras när prestanda ska utvärderas.

Turbulenseffekter

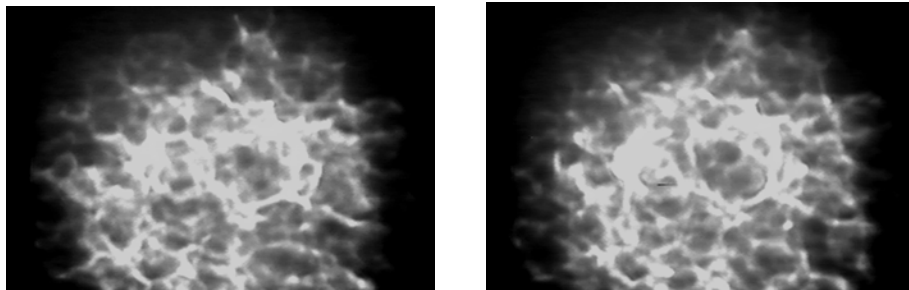
Inverkan av turbulenseffekter vid utbredning av laserstrålar i atmosfären har beskrivits genomgående i flera böcker [37]. Därför kommer vi endast att översiktligt beskriva

fenomenet i det här avsnittet och kommentera hur HEL-system kommer att påverkas samt vilka storleksordningar av prestandaförsämring vi kan vänta i fall då turbulenseffekter måste beaktas. Turbulenseffekter uppstår då brytningsindex i luften varierar pga. temperaturändringar och tryckvariationer. Eftersom vinden förflyttar luftmassor kommer turbulenseffekterna att variera med tiden. Styrkan hos turbulensen beskrivs med strukturparametern, C_n^2 , där $C_n^2 = 10^{-12} - 10^{-13} m^{\frac{2}{3}}$ betecknar kraftig turbulens nära markytan och $C_n^2 = 10^{-16} - 10^{-17} m^{\frac{2}{3}}$ är värden som registreras på hög höjd (~5000m). En grov indelning av olika turbulensstyrkor ges i Tabell 11. Strukturparametern kan användas för att beräkna hur stor effekt turbulensinverkan har vid strålutbredning.

De effekter som en turbulent atmosfär orsakar hos en laserstråle kan sammanfattas enligt

- Strålbreddning
- Strålvandring
- Intensitetsvariationer (scintillationer)
- Vinkeländringar hos vågfronten.

De tre första fenomenen reducerar den momentana och medelvärdesbildade intensiteten vid målet. Ett exempel på hur turbulenseffekter orsakar spatiella intensitetvariationer (scintillationer) hos en laserstråle visas i Figur 49.



Figur 49 Experimentell strålprofil efter utbredning i atmosfären (1km), $\lambda = 515 \text{ nm}$ och tiden mellan de två exponeringarna är 20 ms.

Turbulenseffekter inverkan på laserstrålars utbredning genom atmosfären har studerats ingående och både analytiska och numeriska modeller har utvecklats för att beskriva de fysikaliska fenomen som orsakar en försämring av strålkvaliteten [37]. Modeller för svag och måttlig turbulens beskriver vanligtvis experimentellt observerade resultat ganska väl. Även asymptotiska teorier för kraftig turbulens finns utvecklade. En heltäckande teori (eller modell) som på ett relativt enkelt sätt innefattar alla turbulensstyrkor saknas fortfarande. Syftet med det här avsnittet är inte att ge en heltäckande beskrivning av turbulenseffekter för laservapensystem. Istället kommer några illustrativa exempel ges

som belyser vikten att studera bidrag från turbulenseffekter noga vid design av laservapensystem samt vid prestandabedömningar och utvärderingar.

Tabell 11 Strukturparameterns variation för olika turbulensnivåer

Mycket svag:	$C_n^2 < 6 \cdot 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$
Svag:	$6 \cdot 10^{-16} \text{ m}^{-2/3} < C_n^2 < 6 \cdot 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$
Normal:	$6 \cdot 10^{-15} \text{ m}^{-2/3} < C_n^2 < 6 \cdot 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$
Kraftig:	$6 \cdot 10^{-14} \text{ m}^{-2/3} < C_n^2 < 6 \cdot 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$
Mycket kraftig:	$6 \cdot 10^{-13} \text{ m}^{-2/3} < C_n^2$

Vid svag turbulens kan intensitetsvariationerna hos ett stråltvärnsnitt vid målet beskrivas som

(1)

$$p(I) = \frac{1}{I \sigma_{\ln I} \sqrt{2\pi}} \exp \left(\frac{-\left(\ln I + 0.5 \sigma_{\ln I}^2 \right)^2}{2 \sigma_{\ln I}^2} \right)$$

där $p(I)$ anger sannolikheten för en viss intensitet I . Log-irradiansvariansen, $\sigma_{\ln I}^2$, används vanligen för att uttrycka styrkan hos intensitetsvariationer. Log-irradiansvariansen kan beräknas som (plan våg, svag till måttlig turbulens)

(2)

$$\sigma_{\ln I}^2 = 1.23 \cdot C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$$

där $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ och L är utbredningssträckan dvs. inverkan av turbulens (scintillationer) ökar ungefär med kvadraten på sträckan och omvänt proportionellt mot våglängden. En ökning av scintillationerna kan förväntas när våglängden ändras från mid-ir (2.8/3.8 μm) till COIL (1.313 μm) och fasta tillståndslasrar (0.8-1.0 μm). Strålbreddningen (kollimerad stråle) pga. turbulens kan beräknas för fall med svag till måttlig turbulens enligt följande uttryck[37],

(3)

$$\langle \rho_L^2 \rangle = \frac{4z^2}{k^2 D^2} + \frac{D^2}{4} \left(1 - \frac{z}{F} \right)^2 + \frac{4z^2}{k^2 \rho_o^2}$$

där ρ_L är den effektiva strålradien, D diametern hos laserstrålen vid aperturen, z propageringssträckan och ρ_o den transversella koherensradien. Den sista termen i (3) beskriver bidraget från turbulenseffekter.

Den transversella koherensradien beror på variationer hos C_n^2 , propageringssträckan samt och våglängden. Den effektiva strålradien, w_e , kan ses som ett medelvärde över en längre tid och inkluderar både strålvandring och strålbreddning, där strålbreddningen sker på en kortare tidsskala. Strålvandringen (rörelsen hos strålens tyngdpunkt) kan uppskattas enligt följande uttryck

$$\langle \rho_c^2 \rangle = \frac{2.97 z^2}{\left(k^2 \rho_o^3 D^{\frac{5}{3}} \right)} \quad (4)$$

Den totala strålbreddningen (medelvärdesbildade) beräknas enligt

$$\langle \rho_L^2 \rangle = \langle \rho_c^2 \rangle + \langle \rho_s^2 \rangle \quad (5)$$

där $\langle \rho_s^2 \rangle$ är strålbreddningsbidraget som har en kort tidsskala. Den effektiva strålradien kan beräknas som $w_e^2 = 2 \langle \rho_L^2 \rangle$. Eftersom att laservapen troligtvis använder en fokuserad stråle för att uppnå maximal effekttäthet på målet för att uppnå bäst verkan måste kommer påverkan av turbulenseffekter att skilja sig från en kollimerad laserstråle. Läsaren hänvisas till ref.[38] för mer information. Som ett exempel ges uttrycken för strålvandring i fallen med en kollimerad respektive fokuserad stråle nedan

$$\begin{aligned} \langle \rho_c^2 \rangle &= 6.08 L^2 D^{-\frac{1}{3}} \int_0^L C_n^2(\eta) d\eta & (\text{kollimerad}) \\ \langle \rho_c^2 \rangle &= 6.08 L^2 D^{-\frac{1}{3}} \int_0^L C_n^2(\eta) \left(1 - \frac{\eta}{L} \right)^{\frac{11}{3}} d\eta & (\text{fokuserad}) \end{aligned} \quad (6)$$

där L är propageringssträckan.

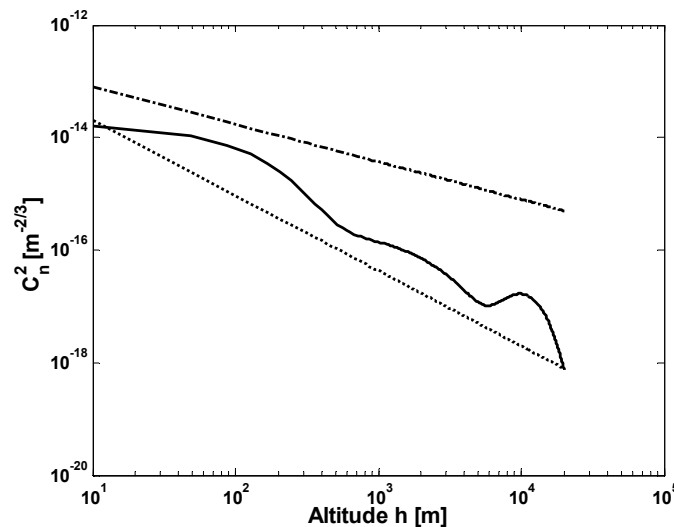
En viktig del vid beskrivning av turbulensfenomenet är temporala (tidsvarierande) effekter som kommer att påverka möjligheter till kompensering med hjälp av adaptiv optik (AO). Generellt kan man säga att tidsskalan för turbulenseffekter beror på storleken hos turbulenscellerna, aperturstorlek och effektiv vind tvärs framför aperturen. Storleksordningen hos turbulenscellerna kan uppskattas med hjälp av den transversella koherenslängden. Följaktligen kan vi uppskatta den karakteristiska frekvensen som

$$(7)$$

$$f_0 = \frac{V_{\perp}}{\rho_o}$$

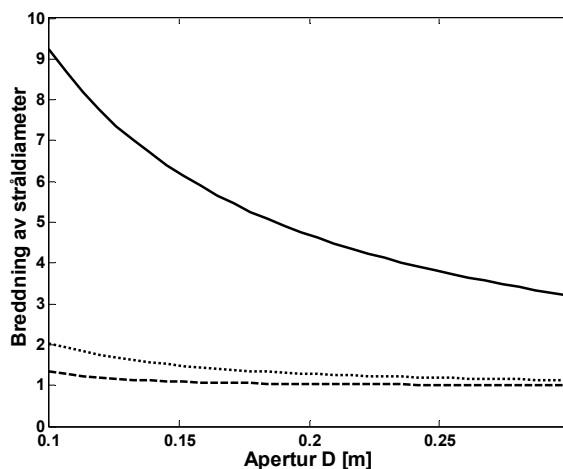
där $V_{\perp}$ är vindhastigheten tvärs aperturen. Scintillationer uppvisar karakteristiska frekvenser av storleksordningen upp till 700-800 Hz. Om ett lasersystem är placerat på en flygande plattform kan den transversella vindhastigheten bli mycket hög vilket medför att en mycket hög bandbredd krävs för ett korrigeringssystem.

Som tidigare nämnts varierar C_n^2 som en funktion av höjden och ovanför inversionsskiktet är turbulenseffekterna betydligt lägre jämfört med uppmätta värden nära jordytan. Ett exempel på hur C_n^2 kan variera ges i Figur 50 där tre olika standardmodeller har använts för att beräkna hur strukturparametern varierar upp till 20 km höjd. Trots att C_n^2 är låg på hög höjd kan turbulenseffekter påverka prestanda eftersom verkansavstånden oftast är långa (jmf. ABL-systemet som har beskrivits tidigare).



Figur 50 Variation av strukturparametern som funktion av höjden för tre olika modeller; Hufnagel-Valley (heldragen), exponentiell model-dag (punkter) samt exponentiell modell-natt (punkter-streckad).

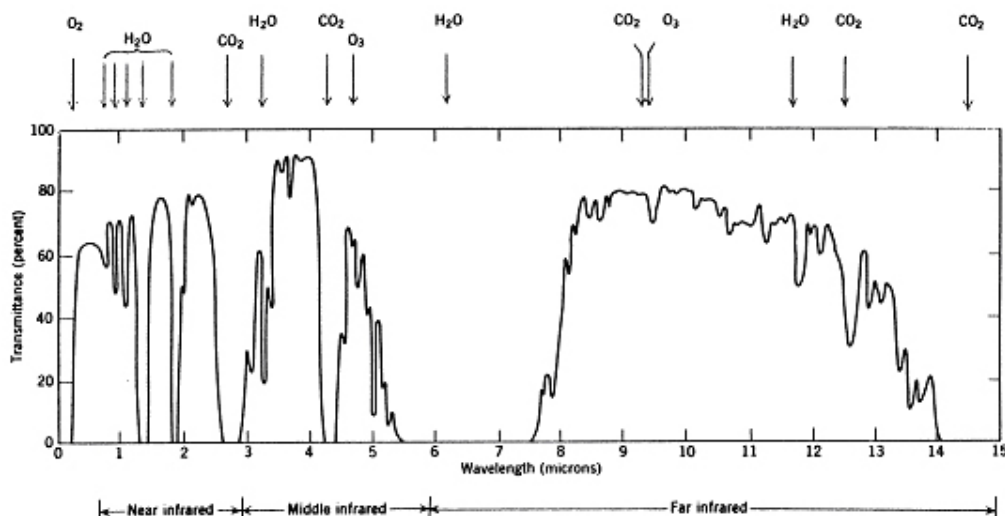
För att illustrera hur turbulenseffekter påverkar ett HEL-system presenteras enkla överslagsberäkningar baserat på formlerna ovan. Det är av intresse att studera hur parametrar som våglängd, aperturstorlek, utbredningssträcka samt turbulensstyrka påverkar laserstrålens kvalitet. Effekter som uppstår vid kraftig turbulens och långa utbredningssträckor då mätning av scintillationer uppstår har inte analyserats. Ett exempel på strålbreddning på grund av turbulens visas i Figur 51, där ökningen (relativt stråldimension vid plattformen) visas för olika aperturstorlekar. Exemplet visar att det svåraste fallet uppstår vid horisontella strålbånor nära marken där turbulensen är kraftig. Våglängden var 1,315 mikrometer vilket motsvarar en COIL-laser.



Figur 51 Exempel som visar hur turbulensen i atmosfären påverkar stråldiametern. Följande parametrar användes: C_n^2 enligt exponentiell dagmodell³⁷, avstånd 10 km, kollimerad stråle, horisontell strålgång höjd 10 m (heldragen), sned strålgång höjd 10m (laser) /1 km (mål) (punkter), sned strålgång 1 km (laser)/10m (mål) (streckad)

Dämpning i atmosfären

I atmosfären finns gaser, partiklar och aerosoler som sprider en laserstråle vilket medför att den ökar sin divergens och kan dramatiskt påverka prestanda hos ett laservapen. Aerosoler är stoftpartiklar som svävar i luften och en del kan binda vatten till sig och bilda droppar som växer och bildar dis och dimma. Detaljerade modeller som beskriver av enkel- och multipelspridningsfenomen finns tillgängliga i flera olika referenser, se t.ex.^{39,40}. Spridningen orsakar enkelt uttryckt att intensiteten hos laserstrålen dämpas. Dämpningen beror främst på koncentration och partikelstorlek där kortare våglängd ger högre dämpning. För partikelstorlekar av ungefär samma storleksordning som våglängden kan spridnings- och dämpningsförhållandena variera starkt. Regn och snö ger relativt våglängdsberoende transmission medan dis, dimma, damm och rök transmittar bättre vid längre våglängder. Storskaliga fenomen som varifrån luftmassan kommer - kontinenten, polarområdet etc. påverkar partikelinnehållet. Kontinentalluft innehåller ofta mycket partiklar och medför reducerad visuell sikt med högre atmosfärsdämpning jämfört med polarluft. Det finns en koppling mellan visuell sikt och den dämpningskoefficient som används för beräkning av atmosfärens transmission som funktion av avståndet. Denna koefficient korrigeras beroende på våglängd, vädertyp och luftmassans ursprung.



Figur 52 Exempel på dämpning i atmosfären nära havsnivån över distansen 1.8 km.

En annan orsak till att laserstrålningen dämpas är att olika gaser i atmosfären kan absorbera strålning. Det främst koldioxid och vattenånga som ger det största bidraget till dämpningen. Andra föreningar som bidrar är metan, kvävedioxid, kolmonoxid m.fl. Dessutom tillkommer olika luftföroreningar som t.ex. svaveldioxid och kväveoxider. Molekyldämpningen är hög inom vissa våglängdsområden medan andra har relativt hög transmission s.k. transmissionsfönster och som lämpar sig för laseranvändning. Transmissionsfönstren brukar anges som 0,3 - 1,3 μm (UV-visuellt och när-IR), 1,5 - 1,7 μm , 2,0 - 2,5 μm , 3-5 μm och 8-14 μm . Våglängder under 0,3 μm betecknas med det solblinda området eftersom solstrålningen absorberas starkt av ozon. Ett exempel på dämpning i atmosfären över havsytan där växelverkan mellan laserstrålningen och atmosfären orsakar tydliga transmissionsfönster som kan urskiljas visas i Figur 52.

Den totala dämpningen i atmosfären kan beskrivas genom att de olika spridningsbidragen summeras. Om ett exponentiell dämpning antas kan transmissionen skrivas som

(8)

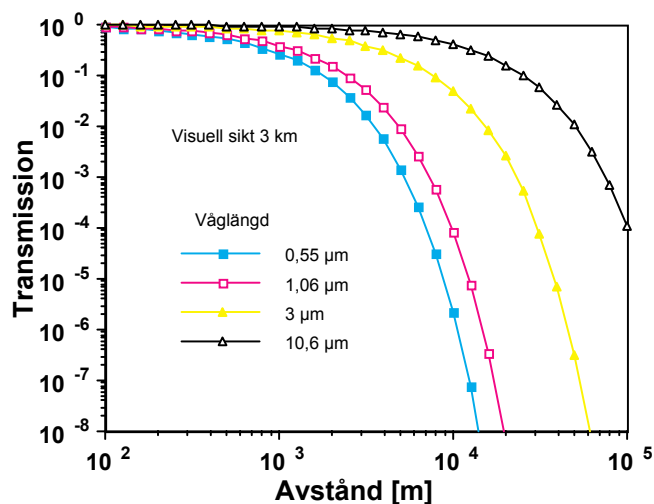
$$\tau = \int_0^z e^{-\alpha(z') \cdot z'} dz'$$

där $\alpha(z)$ beskriver dämpningskonstanten längs utbredningsriktningen. Extinktionskoefficienten, α , kan skrivas som

(9)

$$\alpha = \sigma_s + \sigma_a$$

där σ_s är bidraget från spridning samt σ_a , härrör från molekylär absorption. Dämpningskonstanten innehåller således bidrag från alla spridningsmekanismer och absorption av molekyler.



Figur 53 Transmission som funktion avstånd för olika laservåglängder vid siktsträckan 3 km.

Transmissionen genom atmosfären är också kraftigt beroende av våglängden vilket illustreras i Figur 53. I det här exemplet har siktsträckan antagits vara 3 km och resultaten visar att den långvågiga laserstrålningen har betydligt längre räckvidd jämfört med synligt ljus. Spridningseffekter orsakar här dämpningen inom det synliga våglängdsområdet. Vid val av optimal våglängd för ett laservapen måste en mängd variabler beaktas där, utöver atmosfärkanalens bidrag, storlek hos optik, stråldivergens och Rayleighlängd är viktiga parametrar.

Termisk uppvärmning av atmosfären ("thermal blooming")

Ett fenomen som är karakteristisk för laservapentillämpningar är "termisk blomning" vilket betyder uppvärmning av atmosfären pga. att laserstrålning absorberas. Uppvärmningen orsakar i sin tur en förändring av luftens brytningsindex vilket orsakar att strålprofilen förändras. En annan effekt som påverkar hur mycket atmosfären värms upp är om strålen "kyls av" av vinden eller genom att strålen snabbt förflyttas i sidled. I det enklaste fallet kan man tänka sig uppvärmning av atmosfären då det är vindstilla och då kommer brytningsindex att ändra sig mest i centrum av strålen (där intensiteten är högst). Brytningsindex kommer att vara lägst i centrum vilket i det här fallet kommer att orsaka att strålen defokuseras dvs. fungera som en negativ lins. Då strålen är i rörelse, eller då vinden kyler en del av strålen, erhålls ett mer komplicerat inflytande från atmosfären och strålprofilen distorderas asymmetriskt. Effekter som uppstår pga. absorption av laserstrålning är mycket viktiga för prestanda hos ett laservapen och måste således kunna bestämmas. Några enkla formler för att beräkna effekterna av uppvärmning av atmosfären ges t.ex. i ref.[41, 42]. En mer detaljerad beskrivning och förslag på hur numeriska metoder kan användas för att simulera effekter då laserstrålar med hög effekt utbreder sig i atmosfären har beskrivits av Lukin och Fortes [43]. I det här

avsnittet har vi inte för avsikt att gå igenom detaljerade beskrivningar av fenomenet utan endast förklara bakgrund och orsak samt ge några numeriska exempel på storleksordningar. Effekterna av uppvärmning är också beroende på vilken tillämpning som avses eftersom parametrar som lasereffekt, höjd över havsytan, effektiv sidvind etc. kommer att påverka prestanda.

Den effekt som absorberas av atmosfären kan uppskattas enligt följande formel

(10)

$$I(r, L) = I(r, 0) \cdot e^{\left(-\alpha L - N_B e^{-\left(\frac{r}{a}\right)^2}\right)}$$

Där α är den linjära absorptionskoefficienten, a strålradien, L utbredningssträckan och N_B bestämmer styrkan av uppvärmningseffekterna i atmosfären. Då strålen rör på sig, eller fallet då vinden kyler av strålen, kan N_B beräknas enligt följande uttryck

(11)

$$N_B = \frac{-5.88P(dn/dT)}{\pi a^3 n_o \rho C_p v_w} \cdot \left(\frac{\alpha L^2}{2}\right)$$

där P är lasereffekten, ρ är densiteten, dn/dT är förändringen av brytningsindex som funktion av temperaturen och n_o är atmosfärens brytningsindex. Uttryck för hur atmosfärens brytningsindex varierar som funktion av temperaturen ges bl.a. i ref³⁹. För en fokuserad laserstråle kan strålradien ersättas med en effektiv strålradie enligt

(12)

$$a_{eff} = \left(\frac{La\lambda}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}.$$

Strehlkvotens beroende på atmosfärsuppvärmningen kan relateras till vågfronts aberrationer uppstår vid uppvärmningen och kan uppskattas med följande uttryck

(13)

$$S = \frac{1}{1 + K' N_B^m}.$$

där $K' = 0.0625$ och $m = 2$ för en Gaussisk strålprofil. Med hjälp av Strehlkvoten kan intensiteten hos strålen beräknas

(14)

$$I \propto \frac{Pa^2S}{(\lambda L)^2}.$$

där S ges av equation 14.

Breaux och medarbetare har beskrivit en enkel analytisk modell som kan användas för att uppskatta effekterna vid termisk uppvärmning av atmosfären⁴⁴. Modellen kan användas för enkel systemanalys vid bedömning av inverkan från uppvärmningseffekter. För mer rigorösa beräkningar måste fysikalisk optik och numeriska beräkningsmetoder användas⁴³. Enligt Breaux modell kan man dela in störningarna på laserstrålen i en linjär och icke-linjär del. Den linjära delen beskrivs enligt

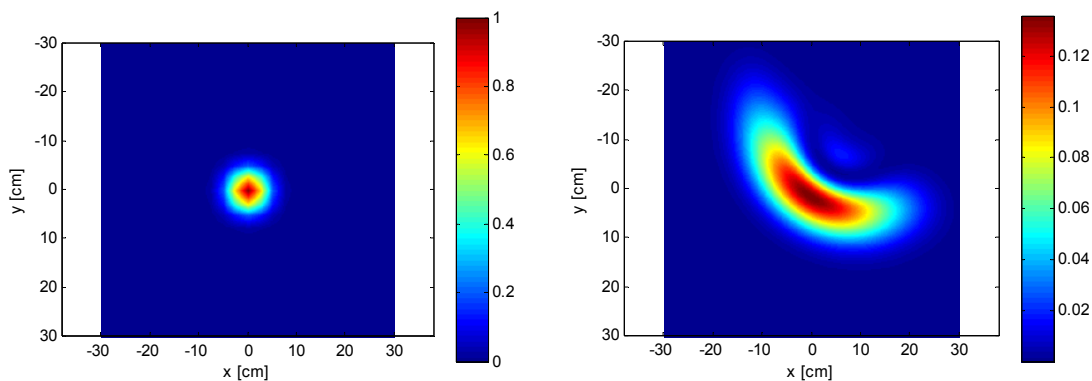
$$\sigma_L^2 = \sigma_D^2 + \sigma_T^2 + \sigma_J^2. \quad (15)$$

där bidragen från diffraktionseffekter, turbulens och strål jitter summeras, se ref. ⁴⁴ för detaljer. Toppintensiteten hos strålen efter att ha förflyttat sig utbredningssträckan L kan skrivas som

$$I = \frac{P \cdot e^{-\varepsilon L}}{\pi L^2 (\sigma_L^2 + \sigma_B^2)}. \quad (16)$$

där P är lasereffekten, ε totala atmosfärsdämpningen och σ_B^2 det icke-linjära bidraget p.g.a. uppvärmningen av atmosfären. För en detaljerad beskrivning av modellen hänvisas läsaren till Breaux et al.⁴³

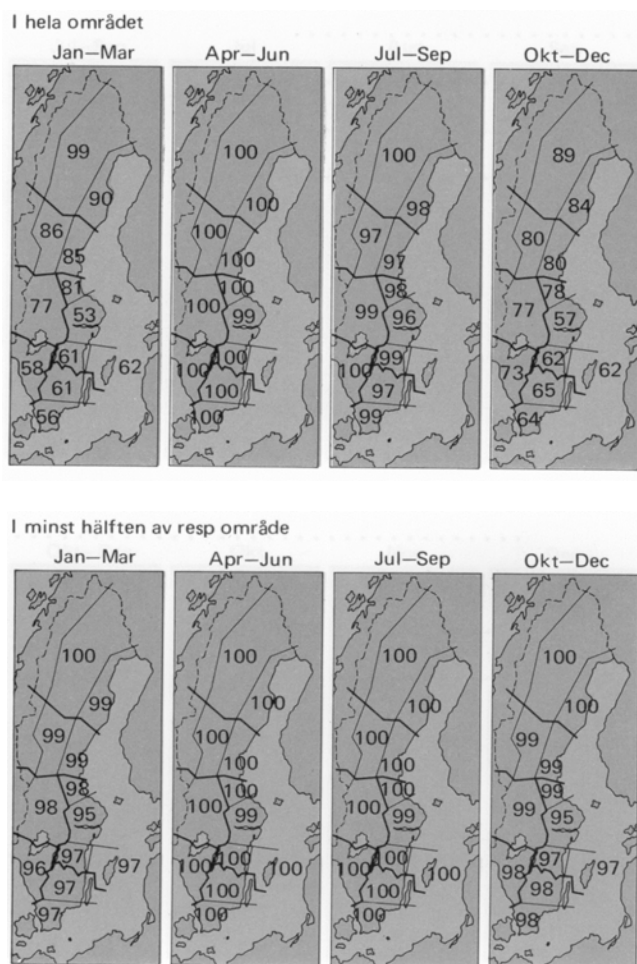
Ett exempel på hur termisk uppvärmning av atmosfären kan påverka en laserstråle ges i Figur 54. Här har vi simulerat ett HEL-system som använder våglängden 10,6 μm och är i MW-klassen. Uppvärmningen av atmosfären orsakar förändringar i luftens brytningsindex som får strålprofilen att distordera och anta en "banan"-liknande form. Som tydligt illustreras i exemplet breddas strålprofilen och toppintensiteten sjunker dramatiskt (ca. 85 % i det här fallet). Adaptiv optik krävs för att korrigera för så här stora försämringar av strålkvalitén för att effektiv verkan ska erhållas. Vid användning av en pulsad laser reduceras effekterna från atmosfärsuppvärmning. Viktiga parametrar i det pulsade fallet inkluderar bl.a. pulsrepetitionsfrekvensen och pulslängden hos lasern.



Figur 54 Exempel på hur uppvärmning av atmosfären distorderar en lasertråle. A) Ingen påverkan utöver diffraktionseffekter. B) Uppvärmning av atmosfären vilket distorderar strålprofilen och reducerar den maximala intensiteten. Observera skillnaden i intensitetsskalor. Följande parametrar användes vid simuleringarna: $D = 50$ cm, ~ 980 kW medeleffekt, strålprofil vid 3.5 km avstånd (fokus 4 km), $\lambda = 10,6$ μm , vindhastighet 14 m/s samt målrörelse 5.6 m/s.

Molnstatistik

En annan viktig del vid bedömning av tillgänglighet och prestanda hos ett laservapensystem är molninverkan och molnstatistik. Statistik visar att sikten oftast är god under en större del av året (Figur 55).

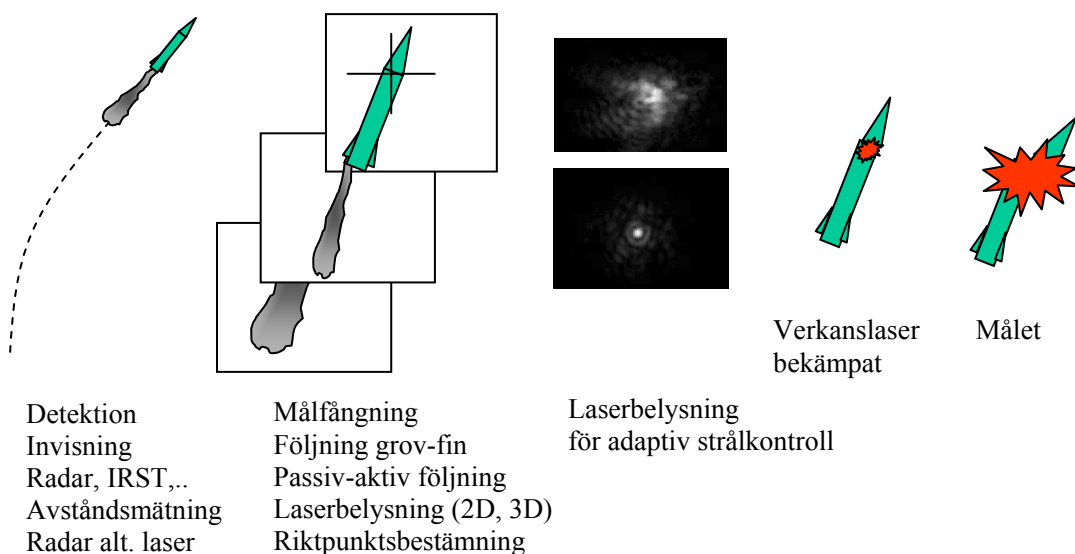


Figur 55 Illustration av siktstatistik och molnbas hämtad från klimathandboken[45]. Relativ frekvensen i hela området för sikt > 2 km och molnbas > 120 m (vänster) och samma sak för minst hälften av respektive område (höger).

Ett exempel på en modell som beskriver molninverkan vid användning av laservapen finns i ref⁴⁶. En ingående diskussion om hur moln påverkar taktiskt uppträdande och prestanda vid laservapentillämpningar ges också i ett appendix i ref.².

Detektion och inriktning

I ett laservapensystem ingår liksom i andra vapensystem en sensor för detektion och invisning av mål, det kan röra sig om radar och/eller IRST. Efter invisning sker grovföljning i regel med en optisk sensor. Man kan följa på målet (robot) eller dess plym. En sensor för finföljning (laser och eller IR) tar över för att ge högupplöst målföljning och träffpunktsbestämning. Laserbelysning ger underlag för adaptiv strålkontroll för att kompensera för plattformsvibrationer, aero-optiska-samt turbulenseffekter. Sedan slås den höga lasereffekten på och följningen under den 1-4 sekunder långa verkanstiden sköts av laser och/eller en IR-sensor. Figuren nedan illustrerar förloppet.



Figur 56. Olika moment i ett laservapens verkansfas. Bildidé efter Lamberson⁴⁷

För att ett taktiskt laservapen med ca. 100 kW effekt skall få effektiv verkan måste strålen koncentreras till en fläck med 10-100 cm² yta på målet. Under verkanstiden måste strålen hållas inom denna lilla yta oberoende av den egna plattformens och målets rörelse. Detta ställer mycket höga krav på följe- och inriktning- samt systemet för strålkontroll. I det ideala vakuumfallet kan en strålens diameter uppskattas enligt:

$$D_{fok\ddot{u}s} \cong \frac{\lambda F}{D} . \quad (17)$$

För taktiska tillämpningar på fpl t.ex. uppskattas en maximal optikdiameter till $D = 30$ cm. Med våglängden $\lambda = 1 \mu\text{m}$ och ett fokalavstånd $F = 10$ km erhålles enligt (17) en fokaldiameter på 3 cm i det ideala fallet. Låt oss anta att strålen inte får flytta sig mer än 1 cm under verkansförloppet. I så fall får vi ett krav på pek- och följnoggrannhet på 1 μrad .

För att realisera en pek- och följnoggrannhet motsvarande avståndet 1 cm på 10 km behövs avancerade sensormatriser, tröghetsplattformar, dynamisk upplinjeriing, adaptiv optik samt inte minst en avancerad programvara med icke linjära kontrollalgoritmer. En översikt av prestanda för konventionella laserföljsystem avseende detektion, total lasereffekt i målet och följprestanda återfinnes hos Steinvall⁴⁸.

Laserpekning

För grovpekning med laserstrålen används mekaniska system, gimbaler och servomotorer. Tekniken är väletablerad med mycket kostsam när man ställer mycket höga krav. Som exempel kan vi ta laserpeksystem för semiaktiv styrning eller nuvarande DIRCM-system där peknoggrannheter nedåt 50-100 μ rad kan realiseras. Mekaniska system begränsas av tillgänglig bandbredd, vinkelgivarnas upplösning samt friktion och svårigheter att peka godtyckligt inom sökande sensors område.

Ett finpekningssystem kan komplettera grovpekningen. Det blir härigenom möjligt att eliminera servobegränsningar i grovpekningssystemet. Finpekningssystemet är fysiskt litet och har en begränsad vinkelutstyrning men kompletterar grovpekningen avseende noggrannhet och bandbredd. De kan vara av både mekanisk och icke-mekanisk art. Inom FM:s fotonikprogram gjordes en översiktsstudie avseende olika tekniker för strålstyrning⁴⁹. I denna studie diskuteras bl.a. mekanisk strålstyrning i form av piezo drivna speglar, Risleyprismor och mikrolinsarrayer. Bland de icke-mekaniska metoderna återfinns akustooptisk teknik, mikromekaniska speglar, optiska fasade arrayer och fakonjugering. Några av dessa tekniker t.ex. piezokontrollerade speglar eller mikromekaniska speglar kan vara tillämpbara för höga lasereffekter.

Följning

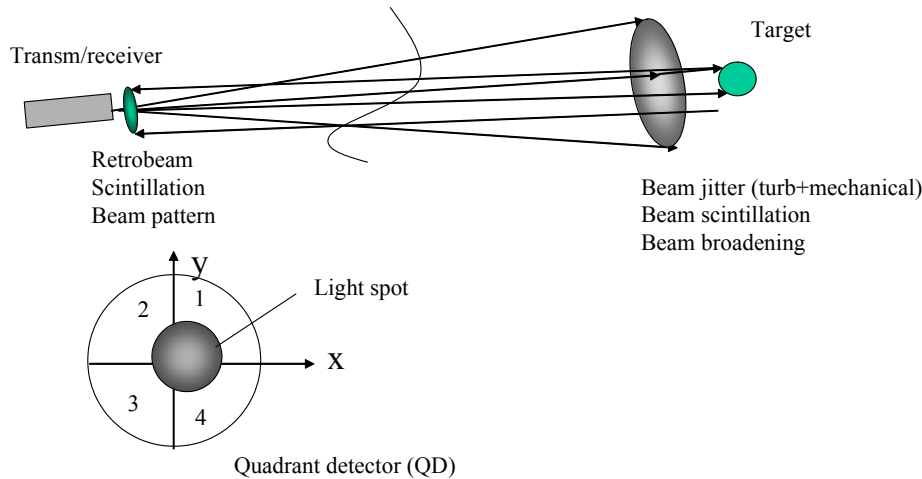
Positionsdetektorer

Följesensorer kan vara av positionstyp eller avbildande. Bland positionsdetektorerna är kvadrantdetektorn den vanligaste med fördelen av enkelhet, hög bandbredd och möjlighet till tidsupplöst registrering av lasersvaret. Om man har ett bra signalbrusförhållande kan man uppnå mycket hög pek och följnoggrannhet. Detta gäller för retroreflexer från optiska system som är öppna för laservåglängden.

Figur 57 visar principen för följdning med kvadrantdetektor. Betrakta en dimension x . Vi definierar summasignalerna från de vänstra resp. högra detektorerna som $I_{1(2)}$. Vi definierar vinklestimatet för målpositionen från:

(18)

$$\frac{\theta}{\theta_s} = q = \frac{I_2 - I_1}{I_1 + I_2}.$$



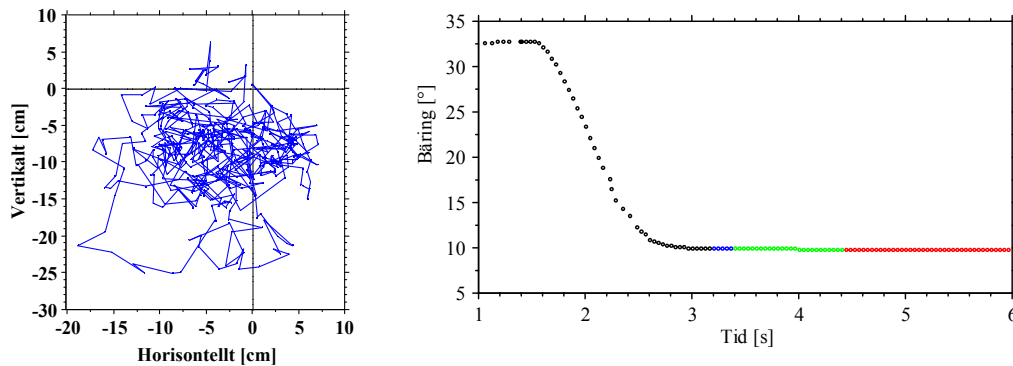
Figur 57. Principen för följning med kvadrantdetektor. Ref. 48.

där θ_s är målsignalens vinkelutsträckning i detektorplanet. Denna fläckstorlek kan uppskattas som det kvadratiske medelvärde av den diffraktionsbegränsade fläckdiameter, den turbulensinducerade fläckdiameter motsvarande dubbla laterala koherenslängden r_0 och målobjektets geometriska vinkelutsträckning. Rms felet σ för vinkeluppskattningen kan skrivas:

(19)

$$\sigma = g(\theta_s) / \text{SNR}_I .$$

där g är en funktion av (ofta en konstant/ θ_s) av fläckstorleken θ_s och SNR_I är signalbrusförhållandet inom följesystemets bandbredd. Rms-felet kan för högt SNR vara betydligt bättre än den optisk upplösningen för lasermottagaren i fråga. Detta kan illustreras från LYSA-systemet där vi i bästa fall kan observera följefel kring 10-20 μrad för den använda laservåglängden (10 μm) och optikstorleken 15 cm. Figur 58 visar exempel på detta samt på ett mätt insvängningsförlopp från målupptäckt från en IRST till mållåsning med laser. För kraftig turbulens kan vinkelfluktuationerna vara större än vinkelupplösningen i teleskopet.



Figur 58. T.v. följemönster från LYSA-systemets vinkelgivare mot ett litet mål på 4.5 km, motsvarande vinkelnoggrannheter mellan 10-20 μ rad. T.h. tidssvaret för insvängning via måldetektering (IRST) till mållåsning med laser.

Avbildande sensorer-passiv följning.

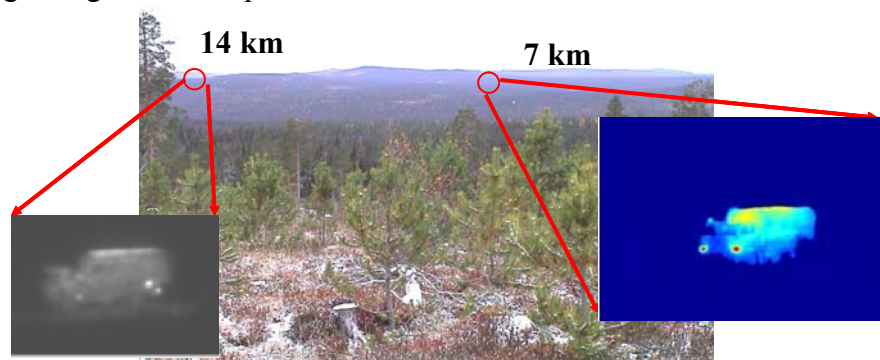
Avbildande sensormatriser kan användas för både aktiv och passiv följning. För CCD-detektorer kan en pixelstorlek på 10 μ m eller mindre erhållas. Med en fokallängd på 1 meter eller mer motsvarar detta en pixelupplösning på 10 μ rad. Följning kan ske med en noggrannhet som betydligt understiger pixelupplösningen. För IR-området finns kvadratiska matriser för både 3-5 och 8-12 μ m området. Bildfrekvenser upp till 1 kHz eller mer krävs för höga prestanda för manövrerande plattformar och mål. Den höga bildfrekvensen uppnås ofta genom att man kan läsa ut en del av bilden med högre hastighet än den nominella. En begränsning med dessa matriser är kravet på ett minimal integrationstid (några mikrosekunder) för att uppnå tillräckligt SNR.

Passiv följning med bildsensorer är vida spridd och speciella video-målföljarkort finns att tillgå på marknaden. Målet måste centreras i följefönstret antingen via centroid-estimering inom följefönstret eller att via korskorrelation från bild till bild för alla möjliga tänkbara målförskjutningar. EO-trackern visar målets vinkelfel för varje bild. Trackern kommenderar inriktningen av vridbordet att reducera detta fel till 0 via en återkopplad loop. En nackdel med enbart passiv tracking är flera. Dels kan man inte vara säker på att upplinjeringen mellan den passiva och aktiva kanalen är helt korrekt - den kan ändras dynamiskt. Dels kan även fel mellan den passiva kanalens och laserns riktning uppstå pga strålvandring via atmosfärens turbulens - denna effekt är våglängdsberoende.

Avbildande sensorer - aktiv tracking.

I allmänhet är aktiv tracking överlägsen den passiva förutsatt att man har tillräckligt signal-brusförhållande. Speciellt attraktiv för aktiv tracking och åtföljande träffpunkts-bestämning är någon form av avståndsbildning alternativt Doppler-avbildning. Härigenom fås en robust möjlighet att segmentera mål från bakgrund.

ABL använder sig av grindad avbildning och på sikt kanske de nya 3 D fokalplane-arrayerna ger möjlighet till högupplöst tracking och träffpunktsanalys. Inom FOI.s verksamhet med grindad avbildning har vi demonstrera högupplösta bilder på långa avstånd. Figur 59 ger ett exempel.

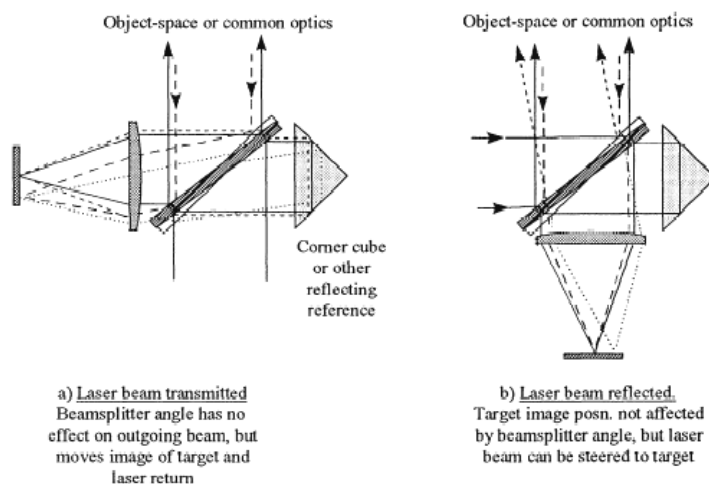


Figur 59. Exempel på bilder med grindad avbildning erhållna med en pulsad laser vmed 532 nm våglängd och 20 cm optik, fokallängd 3 m.

För avbildande sensorer kan träffpunkt bestämmas. Verkanslasern ger då en lysande punkt på den angivna träffpunkten. Antingen betraktas denna direkt i den högupplösta bildsensorn eller också indirekt via en termisk kamera som visar den varma träffpunkten på målet.

Upplinjering ("bore-sighting")

Det är viktigt att dynamiskt kunna kontrollera upplinjeringen mellan en kamera och laserstrålens pekriktning. Den mest tillämpade metoden utnyttjar en hörnkub som riktningsreferens för laserstrålen. Figuren nedan visar principen.



Figur 60. Principen för dynamisk upplinjering mellan laserstråle och följesensor. Efter Gibson⁵⁰.

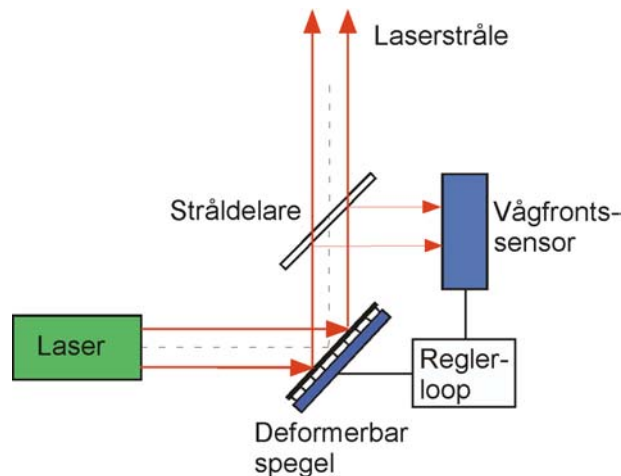
Siktlinjestabilisering

Även om ett följesystem kan fungera trots både den egna plattformens och målets rörelse, så förbättras prestanda väsentligt om man kan utnyttja tröghetsstabilisering. Speciella problem kan vara egna plattformsrörelser inklusive vibration. Tröghetssystem är väl utvecklad teknik och kan i kombination med vibrationsdämpande åtgärder underlätta för följesystemet att i huvudsak åtgärda målets rörelse. Tröghetsplattformar kan antingen utnyttjas ”strapdown” dvs. monteras fixt på vridbordsstativet eller monteras på den rörliga delen av vridbordet. Tröghetsplattformar med 1 μ rad noggrannhet finns utvecklade.

Aktiv/adaptiv optik

En viktig del av ett laservapensystem är delsystem bestående av aktiv/adaptiv optik (AO) som kan kompensera för långsamma och snabba störningar som försämrar vågfronten hos laserstrålen som används för verkan. Utvecklingen inom området adaptiv optik har pågått under de senaste tjugo åren. Den snabba teknikutvecklingen inom mikroelektronikindustrin har medfört att nya komponenter och principer för adaptiv optik har utvecklats. Laservapentillämpningen är den största utmaningen för adaptiv optik från en teknologisk synvinkel. För att nå de räckvidder som krävs för taktiska och strategiska tillämpningar kommer AO-system att vara nödvändiga för att erhålla tillräckligt bra strålkvalité. Särskilt viktigt för AO är system som används i den nedre delen av atmosfären. I USA har man satsat stora resurser på utveckling av AO-system för laservapentillämpningar där ABL-programmet är ett exempel. Speciella laboratorier (t.ex. ”Advanced Concept Laboratory”) har byggts upp.

Adaptiv optik kan användas för att kompensera vågfrontsdistorsioner som uppstår hos laserkällan samt i det optiska strålöverföringssystemet. Här är kraven på temporal bandbredd lägre jämfört med atmosfärsstörningar som turbulenseffekter. Vågfrontsdistorsionerna som uppstår i systemet är också av lägre ordning vilket inte ställer lika stora krav på de kompensande elementen. Den stora utmaningen är att kompensera atmosfärs effekter med hög temporala och spatiella frekvenser. Om laservapensystemet är placerat ombord på en flygande plattform måste även hänsyn tas till aero-optiska effekter som kan försämma strålkvalitén. Aero-optiska effekter uppstår t.ex. i strömningslagren närmast flygplanskroppen.



Figur 61. Principer och komponenter för adaptiv optik.

I ett AO-system ingår i princip tre komponenter; en vågfrontssensor, ett korrigerande element samt ett kontrollsystem. Principen är att degraderingen av laserstrålens vågfront bestäms med vågfrontssensorn varefter kontrollsystemet räknar fram vilka signal som ska skickas till det korrigerande elementet som genererar ett faskonjugat. Genom att applicera ett faskonjugat kan strålens kvalitet väsentligt förbättras. Adaptiv optik i motmedelstillämpningar har tidigare beskrivits⁵¹.

Verkanseffekter

Verkanseffekter kan definieras på flera olika sätt beroende på tillämpning och definitionen av laservapensystemet. En verkansform som inte orsakar irreversibla skador är bländning av elektro-optiska sensorer och utnyttjas t.ex. av system för skydd av flygande plattformar mot värmesökande robotar (DIRCM-system) samt optikspaning. Eftersom laserstrålningen måste ha en våglängd inom EO-sensors känslighetsområde kan verkan i det här fallet definieras från bländning till irreversibel där känsliga komponenter i sensorn som t.ex. detektorn skadas. Graden av verkan beror i det här fallet på den effekt- eller energitäthet som används. Verkan utanför en sensor känslighetsområde kräver betydligt högre effekttätheter eftersom ingen fokuserande optik ökar intensiteten hos laserstrålningen. Nästa grad av verkan kan definieras då skada sker i strukturdelar som t.ex. domer, optikdelar till sikten, huvar till flygplan/helikopter, optiska utblickar etc. Här det flera olika parametrar som påverkar verkanseffekten utöver effekttätheten på målet. Absorptionskaraktistik vid den använda laservåglängden, exponeringstid, värmeledningsegenskaper samt termofysikaliska egenskaper är några exempel.

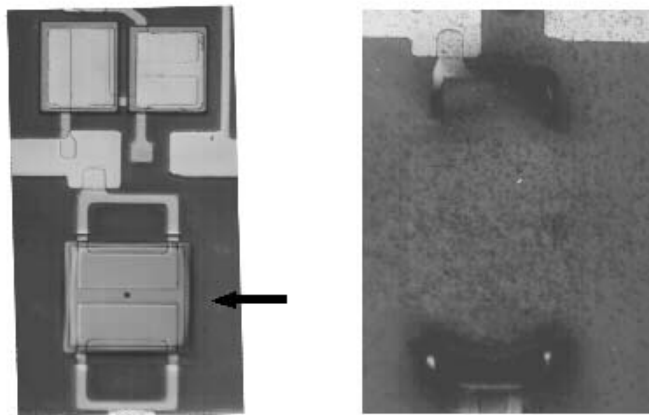
Den mest energikrävande delen av verkan innefattar strukturskada på metallhöljen och liknande som innehåller t.ex. bränsletankar på robotar. Eftersom laservapen på senare tid diskuterats att användas mot olika typer av mål där materialegenskaper kan vara skiftande behövs noggranna experimentella studier och modeller för att beskriva verkansfenomen.

Skada i EO-sensorer

Istället för att störa en EO-sensor kan man använda en laser för att förstöra känsliga komponenter i sensorn. Känsliga komponenter är de som är placerade i eller i närheten av ett mellanfokus i sensorns strålgång. Placeringen i ett fokus medför att infallande laserstrålning fokuseras till en mycket liten yta, vilket medför att en hög effekttäthet erhålls hos den känsliga komponenten. Exempel på känsliga komponenter är retiklar och detektorer. Vanligtvis används en pulsad laser när man vill åstadkomma skada. Eftersom pulslängden kan vara mycket kort kan höga effekttätheter erhållas på detektorytan. Effektivast ur skadesynpunkt är en laser med pulslängder i området 10^{-9} - 10^{-6} s. I det här intervallet är pulslängden hos lasern så kort att ingen värmeöverföring sker i materialet av den absorberade laserenergin.

För att skada en detektor krävs att laserns våglängd ligger inom sensorn känslighetsområde s.k. ”in-band”. Om våglängden ligger utanför känslighetsområdet (”out-of-band”) reflekteras och absorberas laserenergin i sensorns ingångsfönster istället för att nå detektorn.

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 då en synbar skada uppstår på detektorn eller retikelytan och detektormaterialet smälter och förångas. 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 responsiviteten försämrats till följd av laserexponeringen.



Figur 62. Exempel på laserskada hos mikrobolometer som genererats med pulsad laser.

Laserskador är komplicerade att beskriva från en fysikalisk synvinkel. Oftast är inte endast en skademekanism ansvarig för den uppkomna skadan. Vid pulslängder i området 10^{-9} - 10^{-3} s kan man anta att uppvärmning p.g.a. den absorberade laserenergin är den dominerande skademekanismen. Den absorberade laserpulsen orsakar en lokal

temperaturökning i materialet som kan medföra att materialet smälter och förångas. Temperaturfördelningen beror på materialets absorptionsegenskaper. I metaller och halvledarmaterial observeras en hög yttemperatur eftersom all energi som absorberas sker på ytan i ett mycket tunt skikt. Temperaturökningen efter absorption av laserpulsen kan jämföras med smälttemperaturen och en skada förväntas uppstå när smälttemperaturen överskrids.

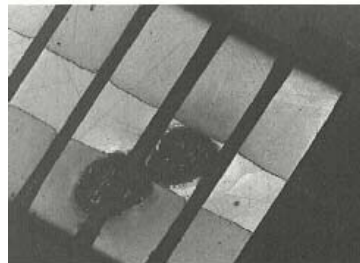
Vid korta pulslängder $< 10^{-9}$ s dominerar mer komplicerade effekter skademekanismen. Till dessa effekter räknas plasmabildning, dielektriska genombrott, multifotonabsorption och frekvenskonvertering. Här är skadefenomenen oftast svåra att beskriva från en teoretisk synvinkel.

För att modeller ska kunna konstrueras är viktigt att studera grundläggande skademekanismer. Modellerna kan användas för att värdera olika systems sårbarhet för laserbelysning.



Retikelskada

Laserskador hos en InSb-detektor



Figur 63. Exempel på laserinducerade skador hos retiklar och detektorer.

Flera olika faktorer påverkar skadetröskeln för laserinducerade skador. De viktigaste parametrarna är; våglängden, längden hos laserpulsen, termofysikaliska parametrar som värmekonduktivitet och värmekapacitet samt stråldiametern. Absorptionsegenskaperna hos materialet är våglängdsberoende, vilket påverkar mängden absorberad energi och följaktligen även skadetröskeln. Pulslängden är en viktig parameter m.a.p. skadetröskeln. Vid långa pulslängder hinner en del av den absorberade energin ledas bort genom värmeledning vilket ökar skadetröskeln. Vid korta pulser, $< 10^{-6}$ s, hinner inte värmen ledas bort från detektorytan. Istället bestäms temperaturökningen här av absorptionsegenskaper hos halvledarmaterialet. En faktor som måste beaktas vid laserskador är antalet pulser som träffar detektorn. Skadetröskeln vid multipulpsexponering är vanligtvis ca. 10-20 % lägre än vid enkelpulpsexponering.

När det gäller detektorskador påverkas skadekänsligheten också av detektorkonstruktionen. En matrisdetektor är mer komplicerad jämfört med en detektor som består av ett enda element. Matrisdetektorn består av ett rutmönster av

detektorelement där lasern fokuseras mot ett element. Man kan förvänta att skadan på ytan blir lokaliserad till laserfläcken och att storleken beror på energitätheten hos laserpulsens. En matrisdetektor för IR-området är vanligtvis komplicerad eftersom utläsningselektronik är integrerad i samma krets. En annan typ av skada som uppstår då detektorelektroniken kortsluts till följd av strömrusning. Man kan också tänka sig att material som förångats till följd av den höga yttemperaturen kondenserar och kortsluter viktiga ledningar. Den geometriska utformningen av en matrisdetektor är således viktig ur skadekänslighetssynpunkt.

Om skadeverkan diskuteras ur en systemfunktionssynvinkel kan skadetröskeln definieras som den energi- eller effekttäthet hos laserpulsens som krävs för att generera en skada så att sensorn inte kan fullfölja sin uppgift. Ett exempel skulle kunna vara skador genererade på en retikelyta i en målsökare. Skadorna på retikelytan medför att målsignalen förändras vilket kan påverka algoritmerna för mållåsning. Ett annat exempel kan vara då en matrisdetektor används, och ett visst antal detektorelement skadas till följd av laserexponeringen.

Strukturskador

Vid användande av en HEL-laser kan strukturförstörande skada på en robot eller en plattform åstadkommas. Energi- eller effektkraven hos lasern är här betydligt högre jämfört med laserverkan inom bandet hos en EO-sensor. Parametrar som är viktiga vid strukturförstörande verkan är peknoggrannhet, stabilitet och fokuseringsförmåga. Målföljningssystemet har en avgörande betydelse för ett HEL-system som ska användas för strukturförstörande verkan.

Målen för en HEL-laser är t.ex. fönster på sensorer, domer, radomer, bränsletankar, huvar på helikoptrar etc. Olika krav på HEL-lasern ställs för olika mål. Betydligt högre effekttäthet krävs för att "bränna hål" i en bensintank jämfört med att frosta ingångsoptiken till en EO-sensor. Radomer på radarmålsökande robotar kan angripas till följd av att ytan hos radomen skadas av laserstrålningen och lobmönstret förändras. Ballistiska missiler är speciellt känsliga i uppskjutningsfasen. Då kan en strukturförstörande laser användas för att påverka den aerodynamiska stabiliteten hos missilen så att den bryts sönder och exploderar. Ett annat tänkbart scenario är att frosta optiken på EO-sensorer eller prismor i ett fordon, vilket medför att fordonets manövrerings- och skjutförmåga slås ut. Med frostning av optik avses inducering av mikrosprickor på ytan. Huvar på helikoptrar och flygplan tillverkas ofta i plexiglas eller polykarbonat. Vid bestrålning vid våglängden 10,6 μm värms ytan upp p.g.a. den absorberade laserenergin och mikrosprickor bildas.

Vid strukturförstörande verkan på olika typer av omslutningar som skal, skrov eller höljen beror skadeeffekterna på flera olika faktorer. Exempel på parametrar är; våglängd, bestrålningstid, rörelse hos målet, material hos målet, atmosfärsegenskaper, effekttäthet hos laserstrålen etc. Med strukturförstörande verkan avses att ett metallhölje bränns

igenom eller att frontlinser och fönster hos sensorer skadas. De båda fallen behandlas separat, eftersom olika förutsättningar krävs för att generera en skada.

Laservapnet antas vara en kontinuerlig eller semi-kontinuerlig laser. Tiden som krävs för att ”bränna igenom” skalet ges av följande uttryck (värmebalansekvationen)

(20)

$$t_m \geq \frac{\rho d [c_p (T_m - T_o) + L_m]}{(I - R) I_o}$$

där R är reflektansen, $T_m - T_o$ skillnad mellan initial- och smälttemperatur, c_p värmekapacitet, d tjocklek hos metallskalet, L_m latent smältvärme, ρ densitet hos materialet och I_o effekttätheten hos laserstrålen.

Vid strukturförstörande skador absorberar materialet så mycket energi att smälttemperaturen uppnås och materialet smälter för att därefter förångas. Processen i detalj är komplicerad och beror på laserstrålningens och materialets egenskaper. En kontinuerlig bestrålning av storleksordningen 1-100 kW/cm² orsakar att de flesta material smälter och börjar förångas. Den effekttäthet som krävs för att bränna igenom en 5 mm tjock aluminiumplåt är t.ex. 80 ms vid effekttätheten 10 kW/cm². Då en pulsad laser används påverkar pulsrepetitionsfrekvensen och pulsenergin till stor del verkanseffekterna. Ytojämnheter och reflektans påverkar tiden att bränna igenom ett metallskal. Utöver de processer som nämnts kan även termiskt inducerade spänningar förstöra känsliga strukturer.

Material av speciellt intresse vid strukturförstörande verkan är aluminium och titanmetaller, olika kolbaserade material, keramer och kevlar samt glas och olika typer av antireflexskikt eftersom dessa material används i många militära tillämpningar.

Ögonsäkerhet

Vid studier av laservapen måste ögonsäkerhet och övriga biokemiska effekter beaktas. Särskilt viktigt är det att analysera dessa effekter när våglängder under $\lambda < 1.5 \mu\text{m}$ används. Skada på ögonen kan ske både avsiktligt och oavsiktligt. Särskilt viktigt är det att studera effekter där diffusa och spekulära reflexer kan uppstå och skada tredje person. Eftersom mycket höga effekter används i ett laservapen kan inte denna typ av skada uteslutas. Vid effekter över tiotals kW bör indirekta stråleffekter från diffusa reflexer beaktas. Under den effektnivån är det endast direkta träffar av laserstrålen över långa avstånd som kan orsaka skada. Vid riskbedömning måste en rad parametrar beaktas. Risknivån kommer givetvis att variera beroende på scenariot. Med ett ryldbaserat laservapen, eller ett laservapen som opererar på hög höjd, riktat mot mål i övre delen av atmosfären är risken för indirekta skador mycket liten. De scenarier som måste analysera noggrant inkluderar situationer där tredje person kan vara inblandade dvs. taktiska laservapen som verkar mot mål nära markytan eller över vatten. Dessa system kan vara

installerade på flygande plattformar eller stationära/mobila lokaliserade på marken. Verkansavstånd och målegenskaper är andra viktiga parametrar vid riskbedömning. Från systemsynvinkel är det lasereffekt (alternativt pulsenergi), stråldimensioner samt våglängd som är de viktigaste parametrarna att beakta vid säkerhetsanalyser.

Skydd

Ett framtida område som bör prioriteras ur forskningssynpunkt är skydd mot laservapen. Med dagens teknikutveckling är det troligt att laservapen kommer att ha utvecklats inom de kommande tio till femton åren. Ett exempel på inbyggd skydd mot laservapen är den Ryska roboten SS27 som uppges rotera under uppskjutningssfasen samt bestå av ett högreflekterande material för att minimera absorption av laserenergi. Andra skyddsåtgärder som har diskuterats för strukturskador är t.ex. material som förångas och kan offras. Andra material skapar ett plasma framför strukturen som ska skyddas som absorberar laserstrålningen. Skyddsaspekter relaterade till HEL-tillämpningar har tidigare diskuterats i ref.⁵².

Simulering av laservapen

Flera olika modeller för att simulera effekter och prestanda hos laservapen har utvecklats. Modellerna beskriver allt från övergripande systemsimuleringar, prestandasimuleringar av delsystem till modeller som beskriver grundläggande fysikaliska fenomen. Syftet med det här avsnittet är att identifiera vilka modeller som finns tillgängliga samt kortfattat beskriva deras egenskaper och begränsningar. Simulering av egenskaper och prestanda hos HEL-system är mycket viktigt eftersom fullskaleprov är mycket komplicerade och dyra att genomföra. Stora resurser satsas för tillfället för att utveckla tillförlitliga modeller som kan förutsäga prestanda hos laservapen.

Viktiga parametrar från prestanda synvinkel kan delas upp till systemberoende parametrar, atmosfärskanalen samt verkanseffekter. Grovt kan simulering och modeller av HEL-vapen och effekter delas in i

- ❑ Grundläggande fysikaliska fenomen
- ❑ Systemutveckling och design
- ❑ Prestandamodeller och övergripande implementering i militära system.

De grundläggande fysikaliska mekanismerna för ett laservapen inkluderar utbredning av laserstrålar i atmosfären samt verkan i målet. Modeller och olika typer av simuleringskoder, både analytiska och numeriska, har utvecklats för att beskriva strålutbredning i atmosfären. Oftast baseras de mest avancerade modellerna på fysikalisk optik där grundläggande utbredningsfenomen och växelverkan med atmosfären kan studeras. Generella modeller som beskriver växelverkan med atmosfären inkluderande t.ex. turbulens och atmosfärsuppvärmning, finns dock ej utvecklade. Modellerna täcker

oftast in delar av de fysikaliska fenomenen utan att vara heltäckande. En annan aspekt är parametrar förväntade i ett militärt scenario snabbt kan förändras. De viktigaste fysikaliska fenomenen vid strålutbredning och växelverkan med atmosfären inbegriper turbulens, spridning i aerosoler, uppvärmningsfenomen, icke-linjära effekter samt dielektriskt genombrott.

Modeller som beskriver verkan i målet har också mycket hög prioritet. I mitten på 1980-talet analyserades SDI-initiativet i USA genomgående varvid verkanseffekter belystes [52]. Det är speciellt viktigt att koppla verkansmodeller till experimentella resultat för att erhålla en verifiering av modellerna. Man kan anta att ett flera klassificerade verkansmodeller existerar som delvis verifierats via fullskaleprov med HEL-lasrar i t.ex. USA, Tyskland, Frankrike och Storbritannien. Laserverkan i olika typer av optiska och andra relevanta material har studerats under en längre tid och många grundläggande skademekanismer och fenomen kan beskrivas. Databaser existerar där skadetrösklar och mekanismer finns beskrivna. Den stora utmaningen när det gäller verkan är att konstruera modeller som kan användas generellt trots den stora mängd variabler/parametrar som existerar vid beskrivning av verkanseffekter vid användning av laservapen.

Tabell 12 Exempel på laservapenmodeller som finns beskrivna i den öppna litteraturen

Modell	Kommentar	Referens
EOSAEL Modulen NOVAE	Moduluppbyggt, spridning, turbulens, laserkällor, aerosolmodeller, moln	Se www.ontar.com alt. www.eosael.com
WaveTrain (tidigare ABLSIM)	Fysikalisk optik, numerisk propagering, AO-system, målbeskrivningar, målföljning, sluten loop, atmosfärseffekter	www.mza.com
LELAWS GLAD	Låg/medeleffekt HEL kan simuleras Fysikalisk optik, numeriska metoder, diffraktionseffekter, turbulens, termisk uppvärmning, adaptiv optik	http://www.bahdayton.com/surviac/ http://www.aor.com

Flera olika modeller finns beskrivna i den öppna litteraturen. Några exempel på modeller ges i tabellen ovan. Modeller som beskriver funktion och prestanda hos system av adaptiv optik har blivit viktiga under de senaste åren som ett led i att AO kan användas för att kompensera för atmosfärs- och systeminducerade effekter. I analysen av HEL-system som presenterats av amerikanska försvarsdepartementet kom man fram till att bättre modeller behövs för att förstå den underliggande fysiken för HEL-vapen. Modellerna måste förankras i experimentella resultat och täcka in ett stort antal variationer i olika parametrar. Speciellt viktigt är förståelsen för verkansmekanismer för olika måltyper. Atmosfärseffekter är ett annat område som identifieras där ytterligare ansträngningar behövs när det gäller modellutveckling liksom modeller som beskriver hela HEL-systemets prestanda dvs. från laserkällan till verkan i målet.

Teknikutveckling

Detta avsnitt belyser kortfattat det tekniska utvecklingsläget beträffande pek- och följesystem, adaptiv optik samt energiförsörjning. Huvuddelen av avsnittet tillägnas laserkällor.

Laserkällor

Den kanske mest kritiska delen för utvecklingen av laservapen är laserkällan. Den måste vara relativt kompakt, ha hög verkningsgrad, bra strålkvalitet och hög medeleffekt. De laserkällor som f.n. tilldrar sig mest uppmärksamhet för laservapentillämpningar är:

- Syre-jod lasern (COIL)
- HF/DF-laser
- Diodpumpade fastatillståndslasrar
- Fiberlasrar
- Diodlaserarrayer
- Frielektronlaser

Tabell 13 ger en översikt. I detta avsnitt skall vi kommentera status med tonvikt på utvecklingsbarhet. Vi kommer inte att beröra den gasdynamiska CO₂ lasern då denna f.n. inte är aktuell för allmändestruktiva laservapen.

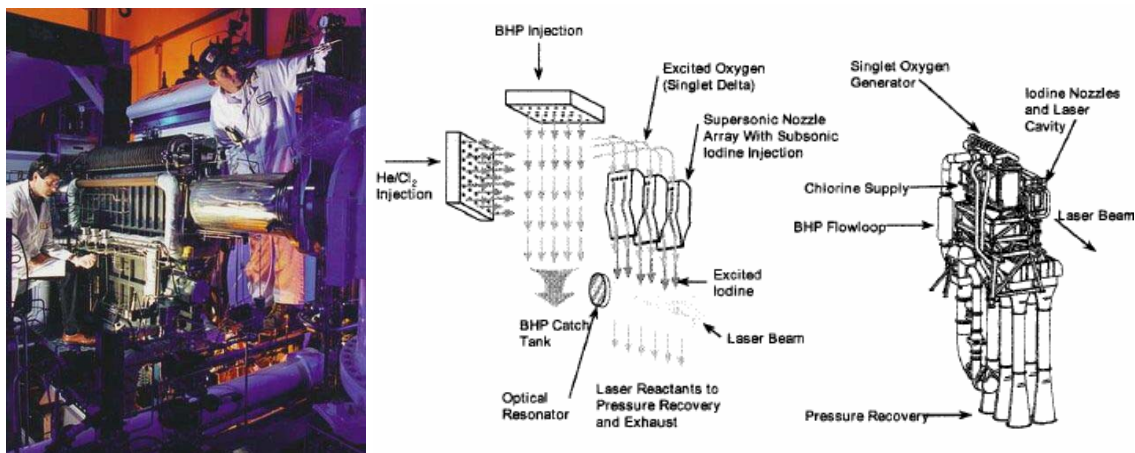
Tabell 13. Laserkällor för laservapen.

Lasertyp	Våglängd d [μm]	Medeleffekt [kW]	Beskrivning
Syre-jod, COIL	1,315	>100	Kemisk laser, används som HEL i ABL-programmet, lasring sker genom de-excitering av jodatomer, jodatomer exciteras genom kemisk reaktion med KOH, H ₂ O ₂ och Cl ₂ .
CO ₂	10,6	50-300	Vanligtvis gasdynamisk, problem med strålkvalité
Diodpumpade fastatillståndslasrar	1,064	0.01- 10	Problem med värmetransport, pumpdioder dyra, möjlig för framtida taktiska flygplanstillämpningar, måste skalas upp till kW
HF	2,7-2,9	>1000	Kemisk laser, teknik finns
DF	3,7-3,9	>1000	Kemisk laser, teknik finns
Fiberlaser	1.06, 1.5	>2	Kommersiella system finns för materialbearbetning. Faskopplade fiberlasrar undersöks för laservapentillämpningar.
Diodmatriser	0,7-0,9	1	Teknik ej utvecklad, kräver faslösning

Syre-jodlasern (COIL).

COIL står för Chemical Oxygen Iodine Laser. COIL används i ABL-projektet. Räckvidden uppges till 50-70 mil erhållen via en 14 stegs COIL-laser med multi-MW kapacitet. Totala vikten inklusive bränsle för 20 skott för hela ABL systemet uppges vara 50 ton, nära maxlasten för ett Boeing 747-fraktflygplan.

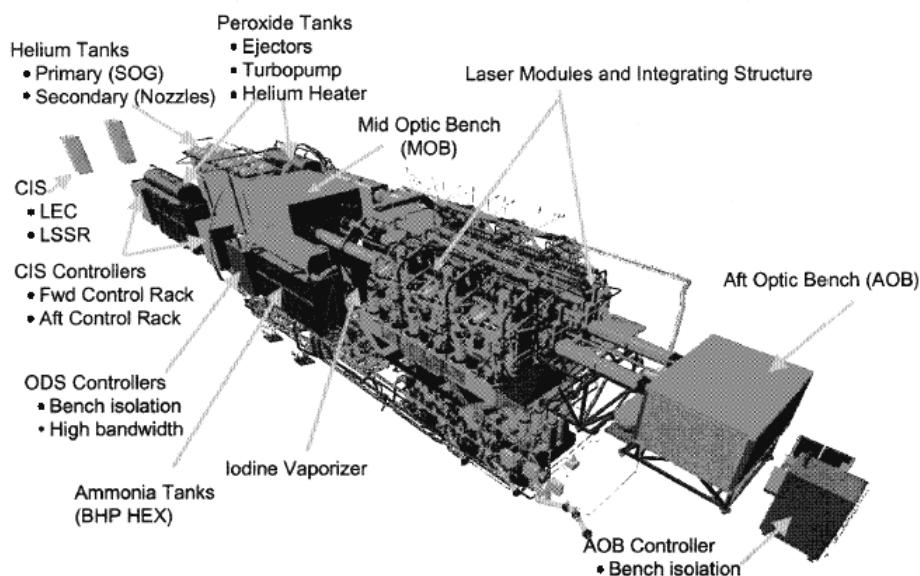
Figur 64 visar principen och utformning av lasermodulerna. BHP betyder Basic Hydrogen Peroxide som sprayas i droppform in i en kammare där de blandas med helium-klor gas. På ytan av varje droppe reagerar klar med OH joner och frigör syre i ett exciterat (singlet delta) långvarigt tillstånd. BHP återcirkuleras genom ett kylsystem och överskottet av klorgasen löses i en vätska. Helium-singlett syre blandningen accelereras genom munstycken där de blandas med injicerade jodmolekyler. Singlett delta syret dissocierar först jodmolekylerna till jodatomer och överför sedan sin exciterade energi till jodatomer i ett exciterat tillstånd. Detta utnyttjas sedan för att i en instabil resonator generera laserstrålning vid våglängden 1.3 μm .



Figur 64. COIL lasern utvecklas för ABL. Bild från ref. 20.

COIL lasern kan ses som en avancerad kemifabrik med en mängd "rörmokeri" som framgår av nästa figur. I den först demofasen kommer endast 6 lasermoduler att provas. Nackdelen med denna lasertyp är komplexitet, begränsat magasin (ca 20 skott "per kemikalie-laddning") samt inte minst de korrosiva och giftiga gaserna. Man försöker i programmet EC-COIL (Electro-Chemical COIL) regenerera gaserna för att slippa laserbränslelager och förlänga "magasinet" samt reducera de personella riskerna vid bränslepåfyllning. Utmaningen ligger i att realisera detta i ett kompakt system. Om man lyckas har COIL lasern förmodligen en framtid som laservapen pga av det höga energiuttaget. Det första steget blir troligen att integrera ett markbaserat

återvinningssystem för ATL (Adv. Tactical Laser). Man förutser att ett sådant återvinningssystem även kan få betydelse för markbaserade HEL.

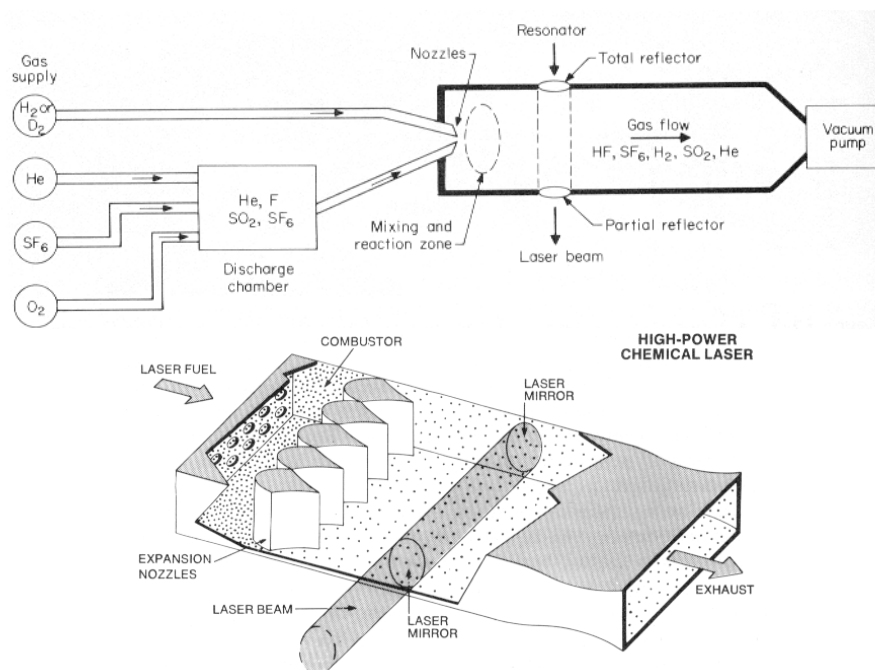


Figur 65. Lasersystemet i ABL. Efter Lamberson (ref. 20).

HF/DF laser

Detta är en laser där kemiska reaktioner mellan väte (H) eller deuterium (D) och fluor (F) producerar en HF eller DF molekyl exciterad till olika vibrationstillstånd. Pumpningen utgörs av den kemiska reaktionen som underhålls på olika sätt. Eftersom fluorgas är extremt reaktivt startar man med svavelhexafluorid (SF_6) eller kväve trifluorid (NF_3). En elektrisk urladdning splittrar molekylen vilket ger fluorgas. Väte eller deuterium finns tillgängligt eller tillsätts processen och den exciterade molekylen skapas i reaktionen med fluorgasen. Med HF kan laservåglängd avstämbar mellan 2,6 och 3,5 μm genereras. DF ger våglängd i intervallet 3,5 – 4,1 μm och är hälften så effektivt jämfört med HF. Lasern kan generera cw stråle eller pulsad stråle beroende på hur den elektriska urladdningen fungerar. Uteffekt upp till 500 W cw har visats med en kommersiell HF laser i multilinje oscillation. Om lasern oscillerar på en linje blir uteffekten maximalt ca 100 W. Uteffekten för pulsad HF laser varierar beroende på utförande men kan ge upp till 1 J pulsenergi i multilinje oscillation med 0,5 Hz prf alternativt 50 mJ vid 25 Hz prf.

För laservapentillämpningar kan denna laser skalas upp uteffekt till MW-klass genom att blanda fluorgasen med väte- eller deuteriumgas och expandera blandningen i



Figur 66. Principen för kemisk laser av HF/DF-typ. Från Hecht⁵³.



Figur 67. Överst visas principen för en kemisk HF/DF laser. Under DF-laser "Miracle" (vid $3.8 \mu m$) vid HELSTF i White Sands (uteffekt MW klass) som enligt utsago varit "tänd" under totalt knappt 4000 sekunder i mer än 160 olika prov sedan 1984. Under t.h. visas 1.5 meterteleskopet "SeaLite" (notera personen under teleskopet).

laserresonatoren med gasflödet i överljudshastighet. Gasflödet går här transversellt resonatorns axel (Figur 65). DF laser används i HELSTF för laserväpningsforskning (Figur 67) samt i THEL och MTHEL. För MTHEL har man ambitionen att reducera storleken på systemet med en faktor 5 (!) och behålla samma utenergi. Utmaningarna för lasern i MTHEL anses vara:

- Utveckla ett mobilt system
- Reducera vikt och volym
- Förbättra strålkvaliteten
- Reducera uppstartstiden
- Reducera livstidskostnader
- Öka tillgängligheten och servicevänligheten

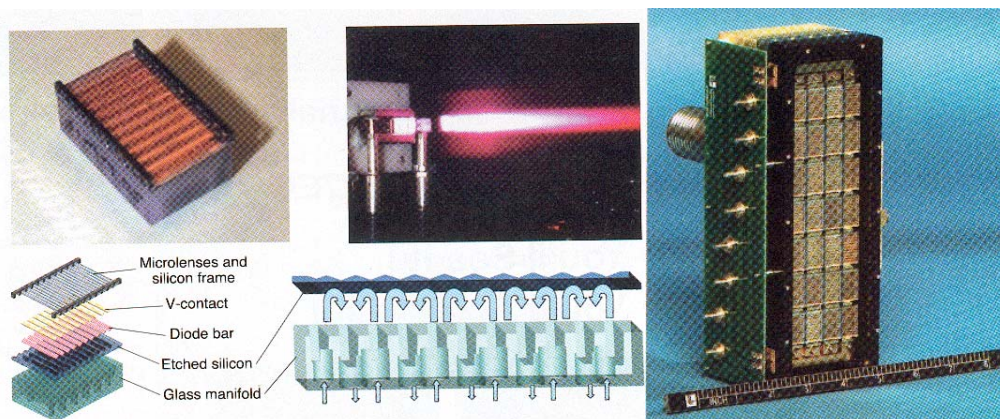


Figur 68. T.v. nästa generations mobila THEL (MTHEL) baserad på en DF-laser. T.h. ett framtida THEL-system i ett mindre fordon.

Diodpumpade fastatillståndslasrar ("Diode Pumped Solid State Lasers", DPSSL)

Dagens kemiska vapenlasrar COIL och DF lasern har båda nackdelen av besvärlig gashantering, begränsade magasin och besvärlig logistik. Om man kunde utnyttja direkt elektrisk pumpning t ex via diodlasermatriser så skulle många av ovanstående problem starkt reduceras. T ex kunde man direkt utnyttja eleffekt från flygplanets eller fartygets motorer/generatorer - vilka kan vara av vara många tiotal MW. Rent allmänt kan man säga att det är många faktorer som talar för SSL för HEL:

- Storlek o vikt
- Skalbarhet till högre effekter
- Ruggad
- Liten logistik
- Inga farliga kemikalier
- Djupt magasin
- Elektrisk pumpning
- Kan dra nytta av kommersiell teknik (laserdioder , laser för materialbearbetning)
- Potential för avstämbar våglängd-flervåglängdsemission

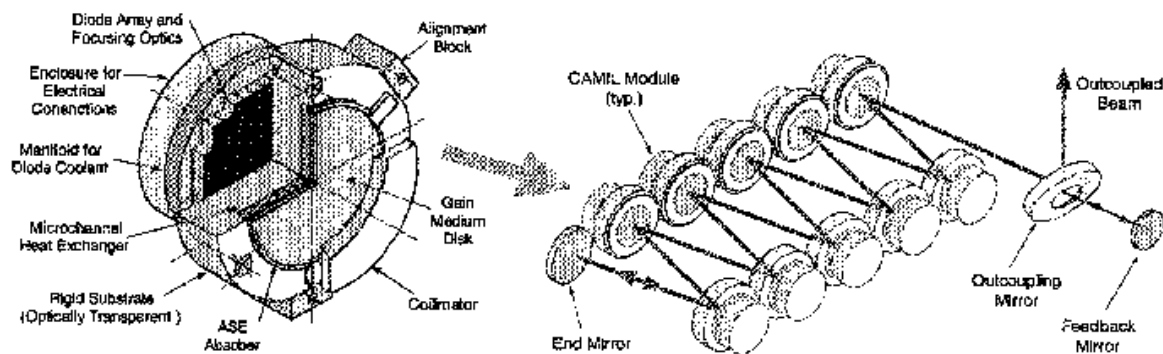


Figur 69. T.v. "Silicon monolithic microchannels" (SiMMS) paket som innehåller mikrolinser, 10 individuella laserdiodmatriser och en enkel monolitiskt kyld kiselplatta som ansluter till ett glasstruktur som leder kylvattnet. T.h. en array med 28 SiMMS som emitterar 40 kW (!) optisk effekt. Från Beach⁵⁴ et.al.

Pumparrayer har utvecklats mot 100 kW nivån, bl a utnyttjande mikrokanalkylning. Se Figur 69.

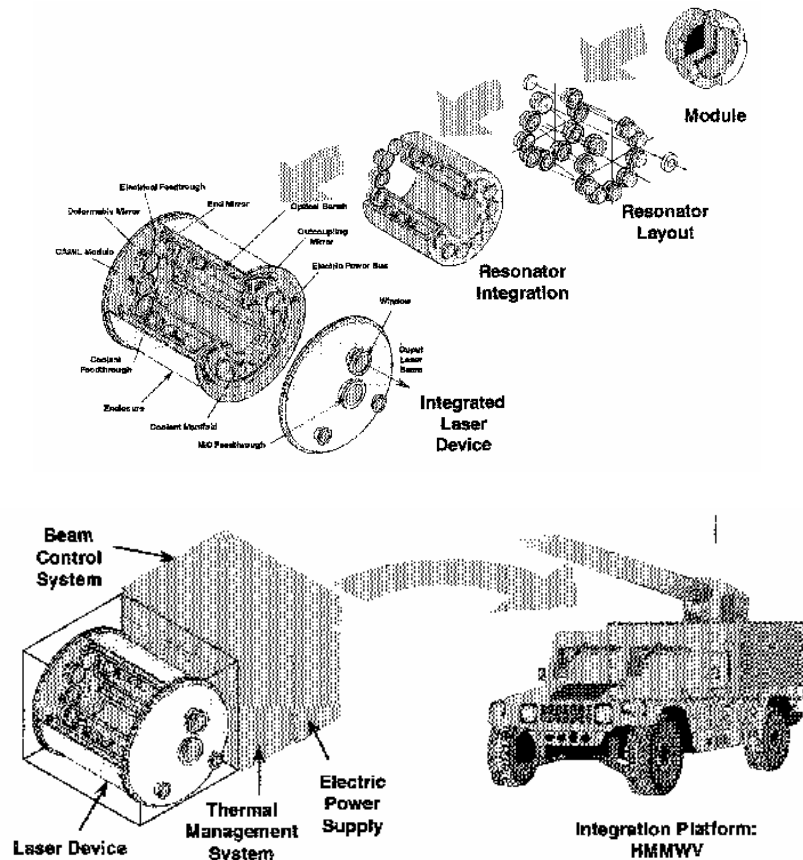
Utmaningen vid utveckling av högenergilaser av DPSSL typ är främst de termomekaniska effekterna som uppstår i det fasta lasermediet pga överskottenergi från pumpprocessen. Även om verkningsgraden för laserdioden är 50 % och verkningsgraden i själva pumpprocessen är nästan lika stor så genereras ändå mycket värme som orsakar termiska linseffekter, mekaniska spänningar och andra effekter som degraderar strålkvaliteten och uteffekten. Detta gör att stavar och slabgeometrier är olämpliga för mycket höga effekter. Lawrence Livermore⁵⁵ som anses ledande för denna typ av högenergilaser har utvecklat skivgeometrier som effektivt leder bort överskottsvärmen.

Skivornas storlek och form reducerar diffraktionsförluster och de termiska gradienterna är i huvudsak i laserstrålens riktning. Figur 70 visar Boeings koncept för fordonslaser.



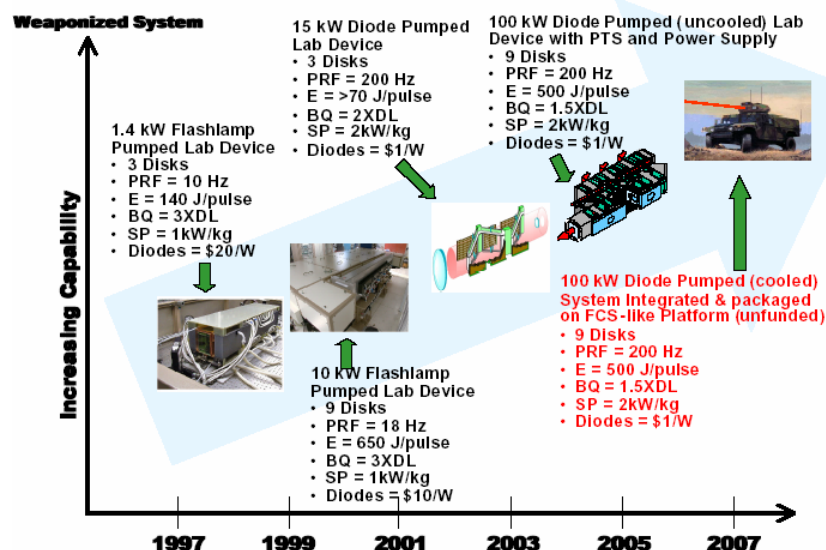
Figur 70. T.v. en skivoscillatormodul och t.h. en modul med 10 enheter. Efter J. Vetronic [55].

Denna typ av geometri har använts vid "Lawrence Livermore" sedan flera årtionden bl a för lasrar för fusionsforskning. Man utvecklar nu en speciell typ som kallas "Heat Capacity Laser" (HCL). Den första versionen sammanställdes år 2001. Den använde blixtlampspumpning och Nd:glasdiskar och producerar 10 kW effekt. Den används i HESTF för olika skadeprov. Man förväntar sig att nå 100 kW med laserdiodpumpning. HCL-lasern lagrar värmen några sekunder i laserkristallen innan kristallen töms och lasern återhämtar sig.



Figur 71. Boeings koncept för fordonsburet laservapen. Från Efter J. Vetric [55].

Figur 72 illustrerar en "roadmap" för utvecklingen av DPSSL för laservapen.

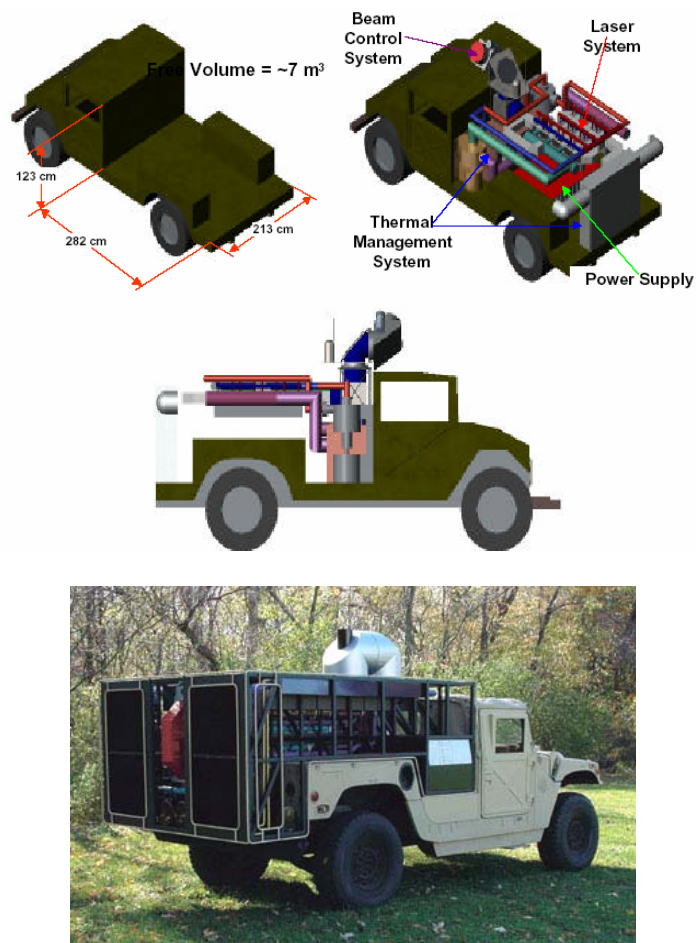


Figur 72. Roadmap för DPSSL utveckling för laservapentillämpningar. Ref. 2.

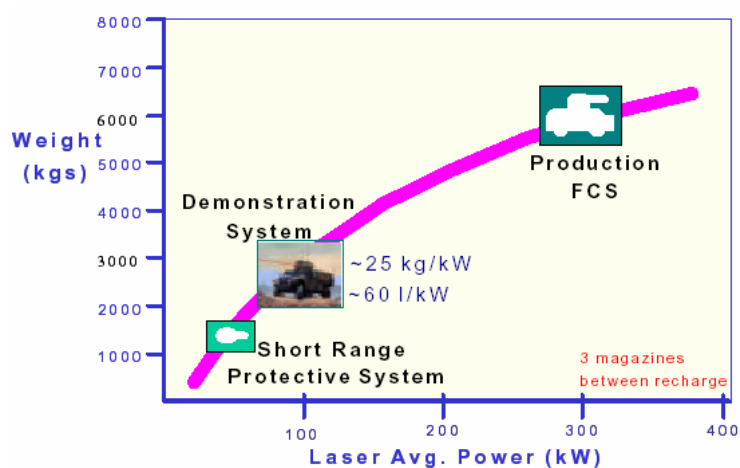
Figur 74 visar Lawrence Livermoores konceptmodell för ett laservapen på 100 kW monterat på en "Humvee". Modellen visar hela systemet inklusive batterier, pulsaggregat, laser, optik och kylsystem. Systemvolymen är ca 7 m³ och vikten 2500 kg. Effektaggregatet är ett batterisystem som laddas av fordonets dieselmotor. Eftersom lasern har 10 % "duty"-faktor och 10 % verkningsgrad så behövs en elektrisk effekt på ca 10 MW (!) med en pulsbredd på ca 0.5 ms och 200 Hz prf. För en taktiskt önskvärd energireserv krävs ungefär 65 MJ i tre magasin. Detta ger totalt ca. 30 skott innan uppladdning på 30 minuter.



Figur 73. 10 kW laser vid 1.06 μm som bestrålar av TOW 2A robotdom i realistiskt luftflöde. 6 pulser a 500 J (totalt 3 kJ) räcker för att kortsluta anslagszonröret så att roboten skulle ha detonerat i förtid. Från Jane's Int. Def. Rev⁵⁶.



Figur 74. Lawrence Livermoores konceptuella modell för ett laservapen på 100 kW monterat på en Humvee. Modellen visar hela systemet inklusive batterier, pulsaggregat, laser, optik och kylsystem. Ref. 2.



Figur 75. "Roadmap" mot ett fodonsburet laservapen. Ref. 2.

Fiberlaser

Fiberlaser kan komma att bli väl så intressant som andra diodpumpade fastatillståndslasrar för vapentillämpningar. Det är b.l.a. möjligheten till bättre värmekontroll (den långa fibern) som gör dem attraktiva som HEL samt har stor flexibilitet eftersom fibern kan böjas och emissionen kan ske långt från effektaggregat etc. Fiberlasrar har hög verkningsgrad, 20 % eller bättre. De är robusta och tämligen underhållsfria. IPG Photonics säljer fiberlasrar upp till 10 kW uteffekt, se figuren nedan. Dessa är emellertid multimod vilket är en nackdel vid stråltubredning.



Main Features:

- ✓ Up to 10 kWatt Output Optical Power
- ✓ Over 20% Wall-Plug Efficiency
- ✓ Excellent Beam Parameter Product
- ✓ >50,000 Hours Pump Diodes Lifetime
- ✓ Air or Water Cooled Versions
- ✓ Maintenance Free Operation
- ✓ Up to 200 m Fiber Delivery
- ✓ 2 Year Warranty

Applications:

- ✓ Welding
- ✓ Cutting
- ✓ Brazing
- ✓ Rock and Concrete Drilling
- ✓ Others

Optical Parameters	Unit	YLR-1000	YLR-2000	YLR-4000	YLR-10000
Mode of operation		CW	CW	CW	CW
Central emission wavelength ¹	nm	1070	1070	1070	1070
Nominal output power ²	W	1000	2000	4000	10,000
Typical beam quality ³	mm*mrad	6	18	20	25
Output power stability (long term)	%	+/-3	+/-3	+/-3	+/-3
Output fiber delivery diameter	µm	100-200	200-300	300-400	400
Electrical Parameters					
Typical electrical requirements	VAC	208-480	380-480V, 3P+PE, 50 - 60Hz		
Maximum power consumption	kW	7	15	30	80
Max. cooling water consumption	m ³ /h	0.6	1.2	3	5
Cooling water temperature	°C	5-30	5-30	5-30	5-30
General Parameters					
Dimensions (WxDxH)	cm	60x79x110	60x79x110	60x79x160	120x79x160
Weight	kg	150	300	450	1000
Ambient temperature	°C	0-45	0-45	0-45	0-45

1 - "Eye-Safe" wavelength @ 1.5µm is available.

2 - Nominal power is specified at the end of fiber delivery. Intermediate power levels are available with 500W increments (e.g. 1500W, 2500W, 5500W, etc.).

3 - After optical coupler and beam delivery cable. Better BPP available.

Figur 76. IPG Photonics fiberlaser upp till 10 kW för materialbearbetning. Observera att man även kan få "ögonsäker" våglängd, 1.5 µm.

http://www.ipgphotonics.com/html/115_cw_fiber_lasers.cfm

Singlemod fiberlasrar har en konstant radiell intensitetsprofil och konstant fas över tvärsnittet. Om multipla enkelmod-fiberlasrar har samma fas och polarisation så adderas de konstruktivt i fjärrfältet. I fokus växer intensiteten med N^2 om N separata fibrer fasläses till varandra. Enkelmodfibrer kan idag köpas upp till 150- 300 W uteffekt, Figur

77. Prestanda från IPG Photonics enkelmod-fiberlasrar framgår av tabellen med utmärkt strålkvalitet och med möjlighet till linjär polarisation.



Main Features:

- ✓ Output optical powers from 1 to 150W
- ✓ Wavelengths from 1530 to 1620nm
- ✓ Over 10% wall-plug efficiency
- ✓ Excellent TEM₀₀ beam quality
- ✓ >50,000 hours pump diode lifetime
- ✓ Air-cooled

Applications:

- ✓ Marking
- ✓ Micromachining
- ✓ Mid-IR Crystal Laser and OPO Pumping
- ✓ Biomedicine
- ✓ 3D Sintering
- ✓ Research & Development

Optical Parameters	Unit	ELR-10	ELR-20	ELR-50	ELR-100
Mode of operation		CW or modulated			
Central emission wavelength ¹	nm	1529-1620	1530-1600	1540-1580	1550-1570
Linewidth (FWHM)	nm	<1	<1	<2	<3
Nominal output power ²	W	10	20	50	100
Output power tunability	%	10-110	10-105	10-105	10-105
Output power stability (long term)	%	+/-1	+/-2	+/-2	+/-3
Typical beam quality	M ²	<1.05	<1.05	<1.05	<1.1
Polarization ³		random	random	random	random
Noise (1kHz - 20MHz)	%	<1.5	<1.5	<2	<2
Electrical Parameters					
Operating voltage	VAC	110/220	110/220	110/220	175/240
Maximum power consumption	W	100	200	500	1200
Cooling method ⁴		air	air	air	air or water
General Parameters					
Dimensions		3U 19"rack	3U 19"rack	4U 19"rack	6U 19"rack
Weight	kg	15	20	40	60
Ambient temperature ⁵	°C	0-45	0-45	0-45	0-45

1 - Fixed wavelength. Preselected by customer and set at factory.

2 - Higher powers available. Up to 1kW in a multimode version.

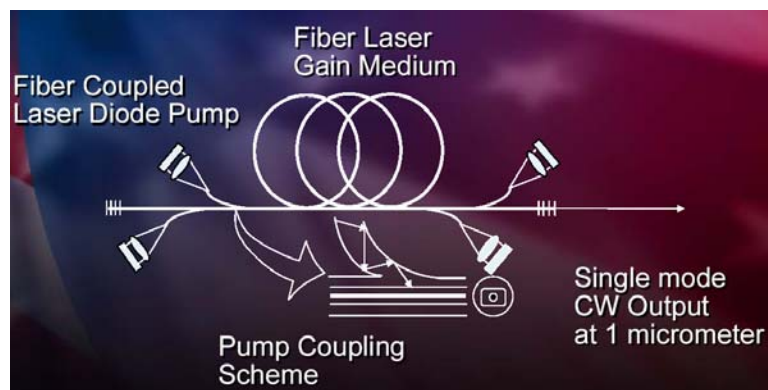
3 - Linear polarization version is available on request.

4 - Customer can specify version.

5 - Extended ambient temperature range is available on request.

Figur 77. Singlemodlasrar från IPG Photonics.

http://www.ipgphotonics.com/html/115_cw_fiber_lasers.cfm



Figur 78. Principeiell uppbyggnad av en diodpumpad fiberlaser. Källa DARPA.

http://www.darpa.mil/DARPAtech2002/presentations/tto_pdf/slides/DurvasulaTTO.pdf

Figur 79 visar teknologi som kan få stor betydelse för att öka enskilda fiberlasrar uteffekt, nämligen fotoniska bandgapsfibrer som kan medge större stråltvärsnitt i fibern, samt SLM teknologi far att faskoppla flera fiberlasrar till varandra.



Figur 79. Teknologi för att öka fiberlaserns uteffekt. Källa DARPA.

http://www.darpa.mil/DARPAtech2002/presentations/tto_pdf/slides/DurvasulaTTO.pdf

DARPA har ett program för högeffektsfiberlasrar syftande till vapentillämpningar. Enligt detta program är följande frågor de största utmaningarna:

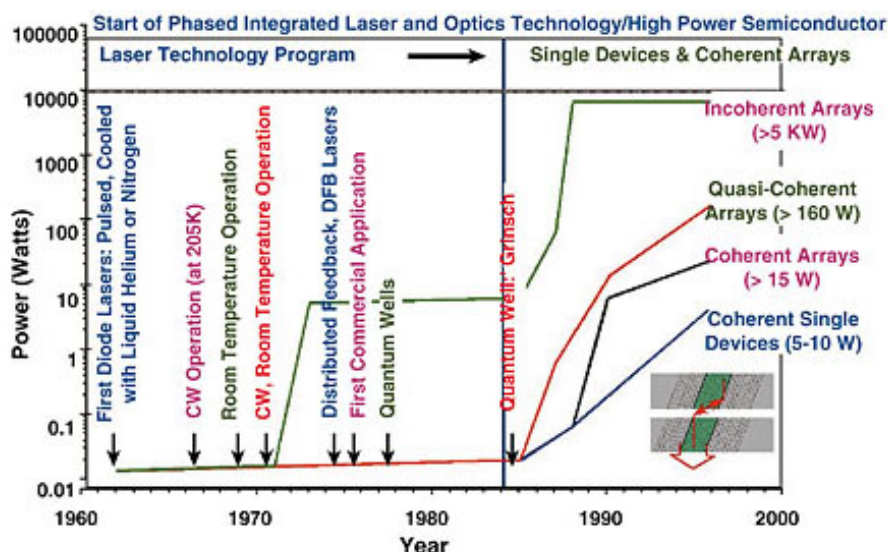
- Eliminera icke-linjära effekter i fibrer med stor modarea.
- Polarisationsbevarande
- Kunna koppla in mycket hög pumpeffekt in i fibern
- Faskontroll för koherent addition av felar fibrer

Under fas 1 av programmet går man fram på två täter. Dels vill man öka enskilda fibrers uteffekt till 100 W eller mer och dels vill man koherent kombinera 100-tals fibrer. Under fas 2 vill man demonstrera 1 kW i enskild fiber och 100 kW eller mer i ett faslåst fiberknippe.

Diodlaseramatriser

Om man kan faslåsa enskilda laserdioder med varandra finns potential att integrera högenergilasersystem i skalet på plattformar. Man kan förbättra strålkvaliteten från enskilda laserdioder med diverse tekniker så att nära diffraktionsbegränsade strålar kan erhållas. Man har demonstrerat 10 tal W från enskilda laserdioder på detta sätt.

Man har även lyckats faslåsa 100-tals diodlasrar till effekter på 160 W eller mer. En framträdande roll i denna utveckling av spelats av AFRL, "Directed Energy Directorate" i Kirtland⁵⁷. I Figur 80 illustreras utvecklingen för diodlasrar och diodlaseramatriser fram till slutet av 90-talet. Tyvärr har vi inte kunna hitta någon information som fyller ut gapet mellan 1996 och idag (2003).



Figur 80. Utvecklingen på laserdiodsidan fram till ca 1996. Källa <http://www.afrlhorizons.com/Briefs/0006/DE9901.html>

Om man skall lyckas fullt ut med faslåsning av diodlaser måste man bl a kunna behärska följande problem:

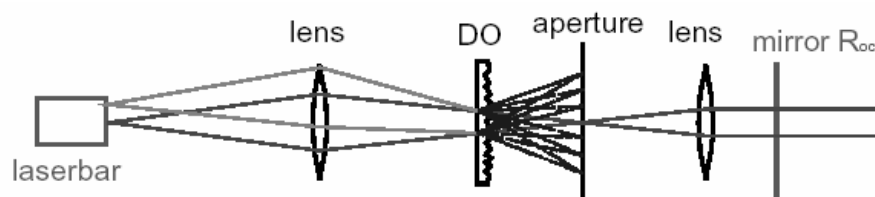
- Kavitetlängdsvariationer hos enskilda dioder måste kontrolleras
- Utgångsspeglarnas vinkel måste kontrolleras
- Den spektrala bandbredden måste kontrolleras så att faslåsning kan ske.
- Man måste kunna avstämna laservåglängden vid sidan av förstärkningskurvans maximum för att uppnå spektral stabilitet.
- Man måste ha ett grepp på båda korrelerat och okorrelerat fasbrus

I USA verkar arbetet med faslåsta diodlasersystem för militära ändamål bli vara lett av en vision som kallas fotofighter. Denna beskrivs som ett snabbmanövrerbart, smygpassat flygplan vars utsida är täckt med en matris av laserdioder och sensorer. En

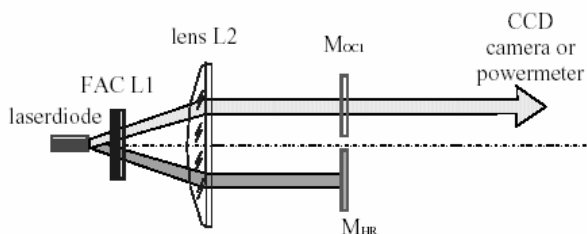
effektiv kontroll av dessa lasermatriser kommer att tillåta flygplanet att samtidigt kunna engagera flera mål avseende måldetektion, följning och igenkänning samt med olika grad av bekämpning. Laserkommunikation är en uppenbar höjlighet med relativt låg lasereffekt.

På lågeffektsidan har många intressanta koncept för faslåsning av laserdioder visats. Raab⁵⁸ et.al. Figur 81 visar det enkla arrangemanget med diffraktiv optik. Man uppnådde med detta en strålkvalitet motsvarande $M^2 < 2$, en förbättring mellan 100-1000 ggr relativt det frivängande alternativet.

Man har även visat hur man kan faskoppla 20 "stripes" i en "storyte" laser ("broad area diode laser"). Man uppnådde $M^2 < 2$ och 0.4 W i en mycket enkel kavitet. Se Figur 82.



Figur 81. Exempel på faslåsning av flera laserdioder i en array. Ett diffraktivt optiskt element (DO) multiplexar flera ordningar från laserdiodarrayen. Bara de koherenta komponenterna i den centrala loben kan passera aperturen. Dessa återkopplas sedan tillbaka och förstärker den koherenta uteffekten. Från Raab²⁹ et.al.

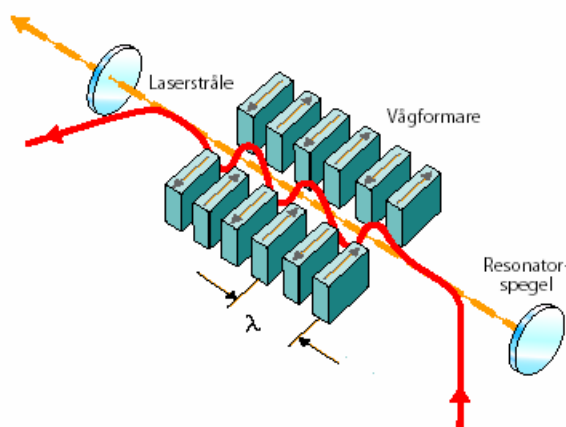


Figur 82. Demonstration av en enkel kavitet för att faskoppla olika delar (stripes) från en diodlaser med stor tvärsnittsyta. Principen (t.v.) bygger på att lasern får operera i en viss vinkel relativt den optiska axeln i en stabil resonans. Bilden t.h. visar en diodlaser som ger 0.4 W driven av två AA uppladdningsbara batterier. Våglängd 940 nm. Från Raab²⁹ et.al.

Fri-elektronlaser

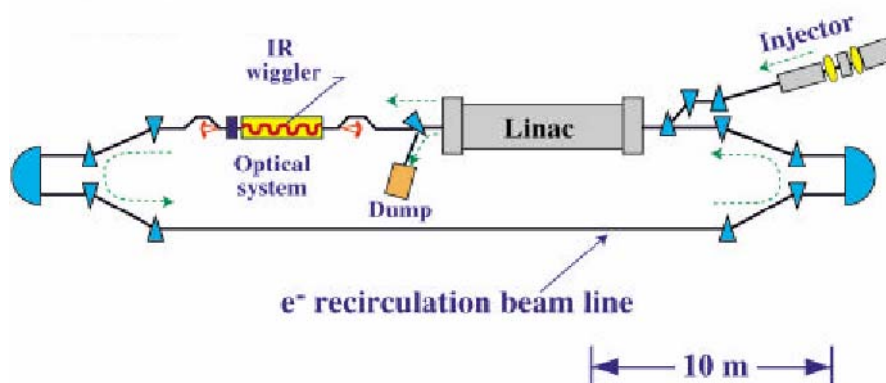
Frielektronlasern kan anses vara ett specialfall av gaslaser. Här utgörs lasermediet av en accelererad elektronstråle som bromsas i ett periodiskt alternerande magnetiskt fält.

Eftersom elektronstrålen åker slalom i magnetfältet kallas det för ”wiggler”. Den genererade strålen går i detta fall längs med elektronstrålen huvudsakliga färdriktning. Detta är inte en laser i strikt mening eftersom det inte är stimulerad emission som genererar laserstrålen. Istället är det synkrotronstrålning från varje slalomsväng som adderas koherent och bildar en stråle som ser ut som en vanlig laserstråle. Förstärkning av strålning får man för våglängder som matchar ett förhållande mellan elektronstrålens energi och magnetfältets periodicitet. Frielektronlasern genererar avstämbar strålning, oftast genom att hålla magnetfältets period konstant och variera elektronstrålens energi. Hög effektivitet kan uppnås vilket tillsammans med acceleratorteknik för högenergi elektronstrålar möjliggör generering av laserstrålar med uteffekt i vapenklass. Detta gör även att denna lasertyp endast finns i laboratorieutförande. Idag kan strålning med våglängder från millimeter till synligt genereras, men forskning pågår för att åstadkomma UV-strålning och till och med röntgenstrålning.



Figur 83. Principen för fri-elektronlaser. Ett varierande magnetfält utnyttjas för att få en elektronstråle i sinusformad svängning undre emission av våglängder motsvarande energiändringar vid elektronrörelserna och ingående elektronstrålens energi.

”US Navy” har tillsammans med civila sponsorer utvecklat en hög medeleffektlaser frielektronlaser (FEL) vid ”Jefferson Labs” i Virginia. Lasern ger 2 kW avstämbar IR strålning i ett pulståg av pikosekundspulser. Detta är världsrekord. Lasern används för olika vetenskapliga och industriella ändamål⁵⁹. En layout framgår av Figur 84.

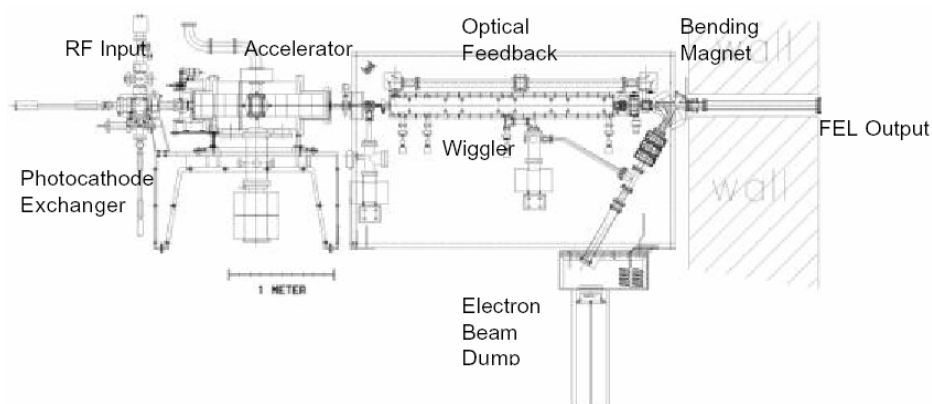


Figur 84. En layout av Jefferson Lab's FEL. Ref. 2.

Den mest egenartade delen av systemet är återvinningskretsen som återvinner en stor del av elektronenergin efter passage genom magneten. Detta ger en hög verkningsgrad mellan 10-15 %. Man studerar även kortpulsåverkan på IR detektorer o liknande känsliga komponenter.

Man avser att uppgradera lasern till 10 kW uteffekt. Studie vid "Jefferson Lab" har indikerat att en 100 kW laser vid 1 μm våglängd är relativt enkel med förbättringar av injektor och kavitetsoptik.

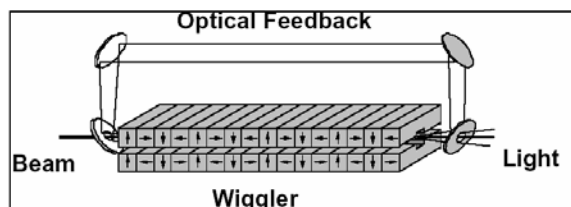
Fram till dags dato är har FEL varit skrymmande och komplicerade laboratorieutrustningar. Los Alamos utvecklar en ny typ av FEL som sägs ha potential att bli kompakt, tom bärbar på kW nivå. På MW nivå tror man att den kan sättas på mobila plattformar.



Figur 85. Layout för "Regenerative Amplifier FEL"(RAFAEL) vid Los Alamos. Ref. 2

Lasern benämns "Regenerative Amplifier FEL" (RAFEL). Denna design tillåter att man löser några av de mest begränsande problemen med FEL nämligen optisk skada på speglar, känslighet för upplinjerings samt extraktionsverkningsgraden.

Optisk skada har varit ett stort problem för FEL eftersom den optiska tätheten inne i kaviteten typiskt är 10 ggr högre än uteffekten. Iden med RAFAEL är att använda en låg-Q optisk kavitet innebärande att man väsentligt sänker den inre optiska effektnivån. Man återinjicerar mindre än 10 % tillbaka i en exponentiellt verkande förstärkare. Den höga enkelpassage förstärkningen (100-1000) förstärker den lågnivå-återkopplade optiska effekten till en mycket hög nivå vid utgången av "wigglern". Efter några rundtrippar mättas den optiska uteffekten. De höga förstärkningsfaktorerna uppnås genom elektronstrålar med hög strömtäthet och med väldefinierad energi samt via en speciellt konstruerad "wiggler" som förmår att kontinuerligt fokusera elektronstrålen genom raden av magneter. Spegelarna kan tillverkas i t.ex. koppar som inte har någon hög reflektionsförmåga.



Figur 86. *Idén bakom RAFAEL. Ref. 2.*

Utsignalen från en RF-driven linjär accelerator FEL är ett pulståg med pulser som har några pikosekunders pulslängd. I en lågförstärknings-FEL måste dessa optiska pulser överlappas med motsvarande elektroniska pikosekundspulser många tusen gånger innan man når full optisk effekt. Detta leder till ett formidabelt upplinjeringskrav: några μm för spegelpositionerna och μrad för spegelriktningarna. I RAFAEL konceptet är förstärkningen hög vilket ger måttnad efter några få passager- upplinjeringskravet sjunker därmed till modesta mm respektive mrad istället.

En annan fördel som erhålles med den höga strömtätheten i RAFAEL:s elektronstråle är att den leder ljuset i analogi med en optisk fiber. Ytterligare en fördel är den höga verkningsgraden som erhålles genom att wigglern har ett med axeln varierande magnetfältperiod eller magnetfältstyrka. På så sätt kan extraktionsgraden ökas från typiska 1 % i "konstanta" wigglers till 10-15 %. Man behöver därmed inte elektron-återvinning som i Jefferson Labs koncept vilket leder till en mindre och kompaktare utrustning. RAFAEL konceptet utvecklöas bl.a. för spegellösa kaviteter i våglängdsområden där speglar inte finns t ex i röntgenområdet och i det extrema UV området.

Man har demonstrerat hög förstärknings-FEL inom IR och det synliga området samt inom det kortvågiga UV området. Extraktionsgrader på 5 % har demonstrerats. I mm-vågsområdet är motsvarande siffra 40 %.

Energiförsörjning av HEL

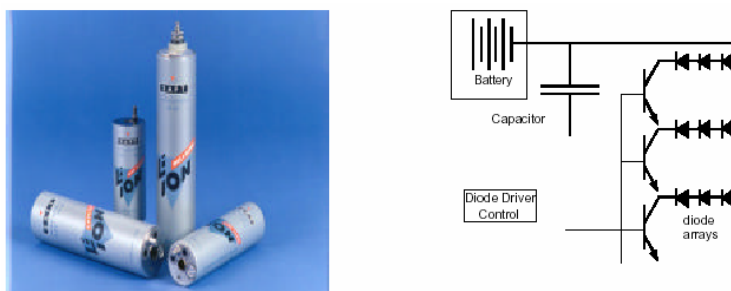
Olika former av energiförsörjning krävs för olika lasertyper. Kemiska lasrar som COIL och HF/DF tillförs störst energi via kemiska processer. Fri-elektronlasern pumpas via en elektriskt matad injektor och elektromagneter. Fasta-tillståndslasrar i form av diodpumpade fiber eller skivlasrar alternativt diodlasermatriser matas elektriskt. För att realisera pod eller fordonsmonterade lasrar behövs goda batterier. Resten av detta avsnitt skall ägnas batterifrågan. Man har även spekulerat i energiförsörjning via sprängämne⁶⁰. Denna metod verkar dock f.n. inte tilldra sig någon större uppmärksamhet.

Tabellen nedan visar specifik effekt och energi för valda kommersiella och nyutvecklade batterier. Tabellen indikerar att blybatterierna antingen är tillgängliga i högeffekts- eller högenergiversjoner men inte med båda egenskaperna i samma batteri. Tyvärr krävs båda egenskaperna i laservapentillämpningen. Det utvecklas emellertid nya batterier som ser ut att få båda egenskaperna. Företaget SAFT LiIon utvecklar bl.a. batterier som verkar lovande i detta avseende, se tabellen.

Tabell 14. Status för batteriutvecklingen (ref.2).

Battery Type	Specific Power (kW/kg)	Specific Energy (kJ/kg)	Technical Readiness
Pb-Acid (HE)	0.3 – 0.4	90 - 125	Commercial
Pb-Acid (HP)	5 - 8	~35	Commercial
Lithium Ion (VHP)	>10	~215	Prototype Data
Lithium Ion (UHP)	>20	~215	3-5 yr Development

VHP ("Very High Power") batterier har demonstrerat > 10 kW/kg och 215 kJ/kg med låg inre impedans. Framtida tunnfilmsbatterier ("Ultra high power UHP") uppskattas få motsvarande >20 kW/kg och 215 kJ/kg. Figur 87 visar hur batterier och kondensatorer kan kombineras för att strömförsörja pumpdioder till lasrar.



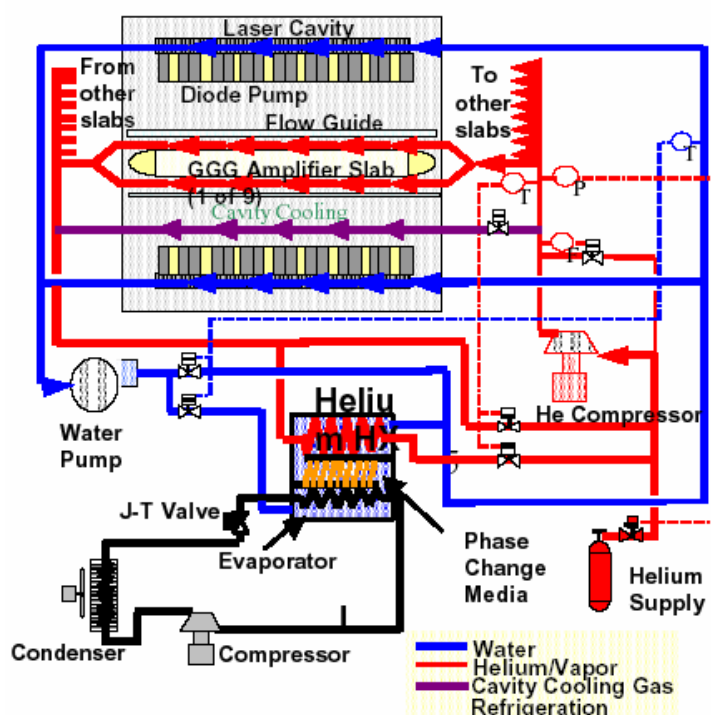
Figur 87. LiJon-batterier och krets för att driva pumplaserdioderna. Ref. 2.

Batterier spelar en stor roll när det gäller systemvikten. Tabell 15 visar en uppskattning a systemvikt för ett fordonsmonterat laservapen för en lösning med VHP respektive UHP batterier med siffror enligt Tabell 15. Batterivikten är mellan 700-1800 kg beroende på val av batterityp.

Tabell 15. Viktuppskattning för ett DPSSL laservapensystem med olika batterilösningar. Från ref 2.

Sub-System	Weight (kg)	
	Lilon VHP	Lilon UHP
Control and Communications	20	20
Laser System	250	250
Beam Control System	298	298
Power Supply	1,812	732
Thermal Management System	889	889
Total	3,269	2,189

Kylsystemet kommer också att uppta en stor del av systemvikten för ett DPSSL system. För ett 100 kW diodpumpat lasersystem kommer dioderna att som mest leverera 525 kW värmeeffekt. För att kunna operera optimalt och hålla våglängden måste diodtemperaturen hållas kring 20° C med en maximalm temperaturökning på +5 ° C. Kylningen måste kunna tåla en hög utetemperatur (40-50 ° C). Man måste gå via värmeväxlare för att inte kylaggregatet skall bli för stort. För nuvarande studeras He-kylning av laserförstärkarna. Detta ger en återställningstid mellan 90-120 sekunder. Man studerar tekniker för att reducera denna tid till 15-25 sekunder för andra förstärkararrangemang.



Figur 88. Kylsystem för diodpumpad fastatillståndslaser för vapentillämpningar. Från ref. 2.

Pek och följesystem

Pek- och följesystem innefattar generellt av begreppet strålkontroll som beskrivits i tidigare avsnitt. Syftet med strålkontrollen är att maximera intensiteten på målet under tiden tills verkan erhållits. Från en teknologisk synvinkel innefattar strålkontroll olika teknologier. Vilken eller vilka olika tekniker som är nödvändiga beror givetvis på HEL-tillämpningen. Ett rymdbaserat laservapen kräver en helt annan teknikutveckling jämfört med ett markbaserat laservapen. Olika funktioner hos HEL-tillämpningen måste noggrant analyseras innan kritiska teknologier och krav för strålkontroll kan definieras. Aktiv och adaptiv optik kan också användas för att förbättra strålkontrollen genom att kompensera för systeminducerade aberrationer. Aktiv och adaptiv optik diskuteras i avsnittet nedan. Exempel på olika funktioner och teknologier som är kritiska för strålkontroll ges i Tabell 16. Utvecklingen av dagens laservapen (1:a generationen) bygger på teknikutveckling och forskning som framförallt initierades under slutet av 70- och hela 80-talet. Utvecklingen av nästa generations laservapen förväntas utnyttja helt nya teknologier (där omfattande teknologiutveckling krävs) för att uppfylla nödvändig prestanda.

Tabell 16 Funktioner och kritiska teknologier relevanta för strålkontroll i framtida laservapen

Funktion	Kritisk teknologi	Kommentar
Aktiv målföljning	Laserteknik, detektormatriser, 3D-detektorer, "Geiger"-mod	Nya funktioner som t.ex. 3D
Passiv målföljning	Optik, detektormatriser	Hög upplösning och känslighet
Atmosfärskompensering	Adaptiv optik	Inkluderar deformerbare speglar (eller liknande), vågfrontssensorer, höga bandbredder
Strålstyrning och pekning	Aktiv optik, "Optical phased arrays", icke-mekaniska komponenter	Nya komponenter, t.ex. elektriskt eller optiskt styrda
Strålupplinjering/strålformning	Reläoptik, "coatings", fönster, okyllda speglar, rymdbaserade speglar	Reducering av vikt och volym hos optik
Målbelysning	Laserteknik	Nya enkla system, låg vikt och volym, höga effekter

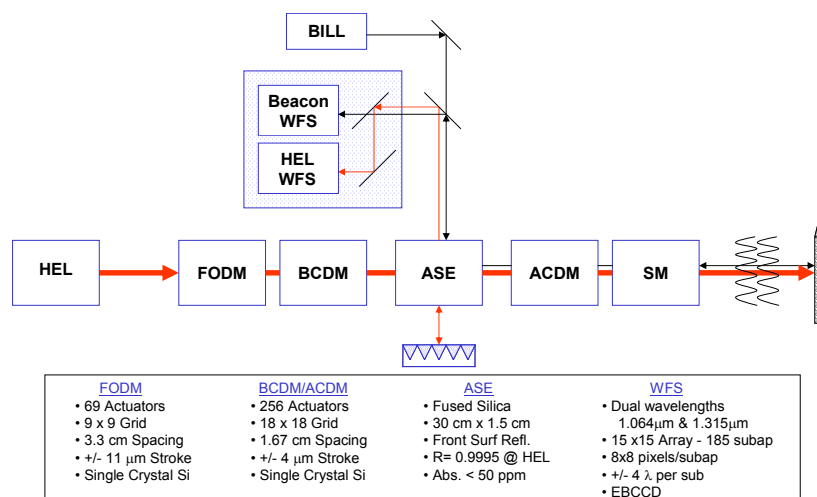
Kraven för strålkontroll och målföljning beror som tidigare nämnts på vilken HEL-tillämpning som avses. I de olika tillämpningarna av laservapen; markbaserat, taktiskt, flygburet (typ ABL), fartygsmonterat eller rymdbaserat (inkluderande användande av reläspeglar) kommer specifikationerna vad det gäller strålkontroll och målföljning att variera. Andra faktorer som påverkar teknikval för strålkontroll och målföljning inkluderar t.ex. lasersystem (pulsat eller kontinuerligt), våglängdsval, verkansavstånd,

taktisk uppträdande, lasereffekt, atmosfärsförhållanden etc. Istället för att lista teknikutveckling för varje specifik tillämpning ges en översiktlig sammanfattning avseende teknikutvecklingens inriktning för strålkontroll.

Nuvarande utveckling av laservapen har fokuserat på teknologiområden som olika typer av fönstermaterial, antireflexbehandlings av optik/optikfönster, belysare för målföljning, AO-system samt matrisdetektorer. Framtidens laservapensystem kräver intensifierad utveckling av komponenter för adaptiv optik, ny optik för rymd och flygburna tillämpningar, nya material och komponenter för strålstyrning och strålstabilisering. Inom området strålstyrning och stabilisering är t.ex. tekniker baserade på ”optical phased arrays” av stort intresse. Här studeras olika koncept för kontroll av laserstrålen på icke-mekanisk väg genom intra- och extrakavitetsmekaniker. Utveckling av nya optiska material förväntas ge nya komponenter där t.ex. icke-linjära optiska effekter utnyttjas. Två viktiga områden som identifieras för framtida utveckling av nästa generations HEL-vapen är nya tekniker för strålkontroll och nya lösningar för optikkomponenter med hög prestanda².

Aktivt/adaptiv optik.

Ett viktigt subsystem i ett laservapen är adaptiv optik för kompensering turbulenseffekter samt absorption av laserstrålning vid utbredning i atmosfären. Beroende på HEL-tillämpning är adaptiv optik nödvändig för att kompensera dessa effekter för att erhålla tillräcklig intensitet på målet. Utvecklingen av komponenter och system för adaptiv optik har skett snabbt de senaste åren, främst genom kraven som ställts genom ABL-programmet. De kritiska delarna i ett AO-system innehåller som tidigare nämnts; en vågfrontssensor, ett korrigerande element samt ett kontrollsystem. För att illustrera komplexiteten i ett AO-system visas ett blockdiagram hur ABL-programmets system för att kompensera atmosfäreffekter, atmosfäruppvärmning samt systemrelaterade aberrationer visas i Figur 89. Kritiska parametrar relaterade till laservapentillämpningen är; hög lasereffekt, krav på hög bandbredd för turbulenskompensering, stora aperturer, hög optisk kvalitet på komponenter, mekanisk robusthet etc. Under de senaste åren har stora ansträngningar gjorts för att reducera kostnaderna för komponenter som kan användas för adaptiv optik.



Figur 89 Blockdiagram som visar AO-systemet i ABL-programmet (källa: Boeing Inc.)

Nya tekniker och komponenter utvecklade för att kompensera atmosfärsaberrationer har studeras intensivt för närvarande. Den snabba utvecklingen inom mikroelektronikindustrin har medfört att nya komponenter utvecklats. I en nyligen utgiven bok av Tyson ges en översikt av de olika teknologier som studeras⁶¹. För att kort sammanfatta tekniker för deformerbara speglar är t.ex. bimorfa, segmenterade samt speglar som använder multi-aktuatorer av intresse. Nya typer av vågfrontsensorer undersökts där metoder som t.ex. direkt mäter fasdistorsionen hos vågfronten är av intresse. Nya tekniker för att rekonstruera vågfronten och på ett snabbt sätt styra den korrigerande komponenten (komponenterna) är under utveckling. Utöver AO-systemet ingår andra kritiska teknologier som belysningslaser (för att generera referenssignal) samt målföljningssystem. Både vågfrontsensorn och målföljning är beroende av utvecklingen av detektormatriser med hög känslighet, upplösning samt snabb uppdateringshastighet. En mycket viktig del för implementering av AO-komponenter i en HEL-tillämpning är skadeträskeln som måste vara hög eftersom mycket höga effekttätheter genereras.

Diskussion och slutsatser

Föreliggande rapport har försökt beskriva nuvarande status för laservapen samt även belysa andra tillämpningar för högenergilaser (HEL). Materialet har till stora delar kommit från USA eftersom de har världens största insats inom området och för att USA gett utrymme för en hel del material inte minst på Internet.

Det torde inte råda någon tvekan om att laservapen kommer att revolutionera vapenanvändningen på många sätt. Blotta tanken på att man i ett taktiskt scenario på 1 mils avstånd kan träffa och förstöra mål av en fotbolls storlek, att man kan göra det i stort sett samtidigt som målets upptäcks och att bekämpningen sker helt tyst och utan sidoverkningar gör att man inser de revolutionerande egenskaperna med laservapnet.

Andra egenskaper som låg kostnad per skott, ”djupa magasin” och liten logistik förstärker denna insikt ytterligare.

Högenergilaser i sig kan revolutionera många andra lasertillämpningar som 3 D laserradar med mycket stor täckningsförmåga, undervattensspaning, måligenkänning på mycket långa avstånd, se genom moln och dimma (nyttja tidsgrindning), stridsfältsbelysning, kommunikation, rökning av ammunition, telekrig, kraftöverföring (till UAV t ex), fjärrinitiering av långa gnistor för störning av både EO och radarsystem, icke letala vapen (bländning över stora områden), fjärranalys av meteorologiska parametrar samt B/C stridsmedel m.m.

För att citera sammanfattningen från rapporten ”High Energy Laser Weapon Systems Applications” av det amerikanska försvarsdepartementet (ref.2):

- Hörenergilaser (HEL)-teknologin har nu utvecklats till den punkt att en familj av operativa tillämpningar ser möjliga ut inom en 10-20 års period. Dessa inkludera användning på flygplan, i rymdfarkoster, på fartyg och på fordon.
- HEL är ett område där USA:s tekniska överlägsenhet kan exploateras.
- HEL erbjuder unika vapenegenskaper (se ovan).
- Det finns mycket stora forsknings- och teknikfrågor som måste lösas för att realisera laservapnens fulla potential. Hit hör utveckling av laserkällor, strålkontroll, effektgenerering och lagring, termisk hantering, förstå och kontrollera atmosfärspropageringen samt att förstå vapeneffekter på olika typer av mål.
- Viktiga ingenjörsmässiga frågor inkluderar tillförlitlighet, storlek och kostnader speciellt för taktiska tillämpningar.

Hur skall vi då bedöma området ur svensk synpunkt? Laservapenutveckling är förenad med stora kostnader och dess nya förmågor måste värderas i relation till konventionella vapen. Det är därför rimligt att FM följer området och vidmakthåller och utvidgar grundkompetenser för att värdera och bedöma laservapenutvecklingen både från aspekterna hot- och möjligheter. Några rekommendationer och slutsatser följer nedan:

- Vidareutveckla kompetensen kring aktiv/adaptiv optik för strålkontroll. Demonstrera adaptiv optik i atmosfären med lågeffektlaser.
- Följ och utöka kompetensen kring fastatillståndslasrar (diodpumpade lasrar baserade på diskgeometri eller dopade fibrer). Gör experiment med lågeffektsystem och simulera högre effekter.
- Komplettera nuvarande LYSA-system för att experimentellt studera förstörande verkan mot högkänsliga mål (t.ex. sensorer inom lasern område). Detta kan ske med måttliga lasereffekter.
- Utveckla modellerings- och simuleringsverktyg för att bedöma laservapen ur hot och användningsperspektiv.
- Studera effekter av HEL på komponenter samt studera metoder för skydd av viktiga mål mot laservapen.

Laservapen bör ingå som en naturlig fortsättning av de studier inom DIRCM som för nuvarande bedrivs på FOI. Man bör etablera en "roadmap" för hela verkanslaserområdet sam via behovsanalys etablera rimliga milstolpar så att existerande kompetens tas till vara och utvecklas på ett för området bra sätt. Laservapen och högenergilaser med dess många andra tillämpningar kan utan tvekan ses som en viktig komponent i det bredare RMA-"Revolution in Military Affairs" (Figur 90).



Figur 90. Laservapen- Revolution in Military Affairs. Källa ref. 3.

Referenser

¹ FOI orienterar om Elektromagnetiska vapen och skydd, FOI OM nummer 1, December 2001.

² US Defense Science Board: "High Energy Laser Weapons and applications", June 2001, <http://www.acq.osd.mil/dsb/rephel.pdf>

³ L. Thompson and D. Goure, "Directed Energy Weapons. Technologies, Applications and Implications", Report, Lexington Institute, February, 2003.

⁴ Defense Science Task Board Force, "High Energy Laser Weapon Systems Applications", Dept. of Defense, June 2001.

⁵ S. E. Lamberson, "The Airborne Laser", *Proc. SPIE*, vol. 4632, pp. 1-9, 2002.

⁶ D. B. Founds, R. R. Ninnerman and M. L. Virgil, "Projected technology needs for an operational space based laser system", AIAA Space 2001 – Conference and Exposition, *AIAA-2001-2863*, 2001.

⁷ I. Falto-Heck and A. H. Strelan, "Overview of the space-based laser integrated flight experiment", AIAA Space 2001 – Conference and Exposition, *AIAA-2001-4752*, 2001.

⁸ J. F. Riker, "An overview of the space-based laser (SBL) program", *Proc. SPIE*, vol. 4632, pp. 181-186, 2002.

⁹ US Air Force, "New World Vistas Air and Space Power for the 21st Century", Directed Energy Volume, Study report, 1995.

¹⁰ J. Schwarz, G. T. Wilson and J. Avidor, "Tactical high energy laser", *Proc. SPIE*, vol. 4632, pp. 10-19, 2002.

¹¹ J. R. Albertine, "History of Navy HEL Technology Development and Systems Testing", *Proc. SPIE*, vol. 4632, pp. 32-37, 2002.

¹² Se bl a W.J. McCarthy, "Directed Energy and the Fleet Defense- Implications for naval Warfare", Occasional Paper No. 10, Center for Strategy and Technology, Air War College, May 2000.

¹³ A. Kantrowitz, *Aeronaut. Astronaut.* vol. 10, p. 74, 1972.

¹⁴ C. W. Larson and F. B. Mead, Jr, "Energy conversion in laser propulsion", 39th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, *AIAA 2001-0646*, 2001.

¹⁵ M. A. Libeau, "Experimental measurements of the laser-induced reaction on a lightcraft engine", 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, *AIAA 2003-300*, 2003.

¹⁶ Bradley C. Edwards, "The space elevator: an ideal application for the free electron laser", *Proc. SPIE* Vol. 4632, Photonics West, 2002.

¹⁷ Counterair: The Cutting Edge A Research Paper Presented To Air Force 2025 by Col (Sel) Rick W. Lester and CDR Steven M. Jacobs meyer (USN), 1996.

-
- ¹⁸ J. Schwarz and J-C. Diels, "UV filaments and their application for directed energy", *Proc. SPIE*, vol. 4632, pp. 122-133, 2002.
- ¹⁹ B. L. Fontaine, F. Vidal, Z. Jiang, C. Y. Chien, D. Comtois, A. Desparois, T. W. Johnston J.-C. Kieffer and H. Pepin, "Filamentation of ultrashort pulse laser beams resulting from their propagation over long distances in air", *Phys. of Plasmas*, vol. 6, pp. 1615-1621, 1999.
- ²⁰ "Laser Weapons - The dawn of a New Military Age", av Bengt Anderberg och Myron Wohlbarsht, Plenum Press, 1992, ISBN-0-306-44329-5.
- ²¹ "Airborne Laser- Bullets of Light" av Robert.W. Duffner, Plenum Press, 1997, ISBN-0-306-45622-2.
- ²² [GAO REPORT "Missile Defense: Knowledge-Based Decision Making Needed to Reduce Risks in Developing Airborne Laser."](#)
- ²³ Janes International Defense Review 2/1997.
- ²⁴ <http://www4.janes.com/search97cgi/>
- ²⁵ <http://www.milparade.com/2001/48/03>
- ²⁶ <http://www.milparade.com/2001/48/03>
- ²⁷ <http://www.Newsmax.com/>
- ²⁸ Se t ex "Beam Weapons" av Jeff Hecht, Plenum Press, 1984, ISBN 0-306-41546-1.
Se även t ex "Science and Technology of Directed Energy Weapons", American Physical Society Study, Reviews of Modern Physics, Volume 59, Part II, July 1987.
- ²⁹ O. Steinvall, M. Flaum och K.Karlsson " Laser för skydd av fartyg mot optiskt styrda vapen: Inledande beräkningar, simuleringar och spelkort", FOA RH--96-00137-3.1.
- ³⁰ E. Berglund, P. Brämning, F. Andresson, O. Steinvall, A. Hågård, L. Mylen och S. Johansson, " Försvar mot attack-och sjömålsrobotar", FOI-RH—98-00324-314, mars 1998.
- ³² Bolander, G., Allard, L., Berglund, F., Karlsson, K., Larsson, H., Larsson, T., Steinvall, O., Widén, A., "LYSA-prov 2001", November 2001.
- ³³ L. Allard, F. Berglund, G. Bolander, F. Gustafsson, K. Karlsson, T. Larsson, O. Steinvall "Slutrapport LYSA - etapp 2", Nov. 2002.
- ³⁴ Tactical HEL Fighter, an Integrated Study Team of government personnel and major command (MAJCOM), US Air Force.
- ³⁵ O. Steinvall, T. Carlsson, C. Grönwall, H. Larsson, P. Andersson och L. Klasén, " Laser Based 3-D Imaging New Capabilities for Optical Sensing", FOI-R--0856—SE, April 2003.
- ³⁶ O. Gustavsson, A. Hågård, E. Karlsson och R. Persson, "Vågutbredningsanalys för elektro-optiska system. En förstudie", FOI rapport, FOI-R--0513--SE, 2002.
- ³⁷ Se t.ex. L.C. Andrews and R.L. Phillips, "Laser Beam Propagation through Random Media", SPIE Press, Bellingham, 1998, R.L. Fante, "Electromagnetic beam propagation in turbulent media", *Proc. IEEE*, vol. 63, pp. 1669-1692, 1975 och R.L. Fante, "Electromagnetic beam propagation in turbulent media: An update", *Proc. IEEE*, vol. 68, pp. 1424-1443, 1980.

-
- ³⁸ L. C. Andrews, R. L. Philips och C. Y. Hopen, "Laser beam scintillation with applications", SPIE Press, Bellingham, 2001.
- ³⁹ F. G. Smith, "Atmospheric propagation of radiation", vol.2, IR/EO Systems Handbook, SPIE Press, Bellingham, 1993.
- ⁴⁰ W. L. Wolfe och G. J. Zissis, "The infrared optical handbook", Office of Naval Research, Washington DC, 1985.
- ⁴¹ "Directed energy systems", vol.8, IR/EO Systems Handbook, SPIE Press, Bellingham, 1993.
- ⁴² R. Tyson, "Principles of adaptive optics", Academic Press, London 1991.
- ⁴³ V. P. Lukin och B. V. Fortes, "Adaptive beaming and imaging in the turbulent atmosphere", SPIE Press, Bellingham, 2002.
- ⁴⁴ H. Breaux, W. Evers, R. Sepucha och C. Whitney, "Algebraic model for cw thermal-blooming effects", Appl. Optics, vol. 18, pp. 2638-2644, 1979.
- ⁴⁵ Klimathandbok för försvarsmakten, Kli H M 7748-500232, 1975.
- ⁴⁶ Cloud modeling for laser weapon propagation analysis, Nahrstedt, David A., Boeing Co. Publication: Proc. SPIE Vol. 4034, p. 69-81, Laser Weapons Technology, Todd D. Steiner; Paul H. Merritt; Eds. Publication Date: 7/2000
- ⁴⁷ S. E. Lamberson, "The Airborne Laser", Proc. of SPIE, Vol. 4632, pp. 1-9, 2002.
- ⁴⁸ O. Steinvall, "Performance of laser tracking of small targets during turbulence and beam jitter", SPIE vol. 5085, paper 37, April 2003.
- ⁴⁹ S. Hård, S. Jacobsson, B. Löfving, U. Olin, P. Rudquist, L. Sjöqvist, O. Steinvall and S. Walles, "Laser Beam Steering - An Introductory Study", FOA-R--99-01158-408--SE, 1999.
- ⁵⁰ A. Gibson, "Laser Pointing Technology", Proc. SPIE, Vol. 4034, Orlando 2000.
- ⁵¹ L. Sjöqvist, "Adaptive Optics in Laser Countermeasure Applications", FOA Report, FOA-R--00-1736-612--SE, 2000.
- ⁵² "APS Study", *Rev. of Modern Physics*, vol. 59, no. 3, Part III, 1987.
- ⁵³ J. Hecht, "Beam Weapons", Plenum Press, 1985. ISBN 0-306-41546-1.
- ⁵⁴ R.J. Beach, B.L. Freitas, "Practical 100-kW class diode arrays emerge", Laser Focus World, dec. 2001.
- ⁵⁵ J. Vetrovec, "Solid-state Laser High-Energy Laser", Proc. SPIE Vol. 4632, Photonics West, 2002.
- ⁵⁶ Solid-state lasers break out of the lab, Janes International Defense Review, febr. 2003.
- ⁵⁷ Se t ex <http://www.afrlhorizons.com/Briefs/0006/DE9901.html>
- ⁵⁸ Volker Raab and Ralf Menzel, "Phase-locked array of 25 broad-area lasers", Proc. SPIE Vol. 4629, Photonics West, 2002.

⁵⁹ M. Shinn, "High Power Free-Electron Lasers - A New Laser Source for Materials Processing," SPIE Vol. 4065, (2000) 434-440.

⁶⁰ O. Gustavsson, S. Karlsson, L. Sjöqvist, O. Steinvall och J. Pettersson, "Studie över sprängämnesdriven laser", FOA-R--00-01695-310,612--SE, 2000.

⁶¹ R. Tyson, Ed., *Adaptive optics engineering handbook*, Marcel Dekker Inc., New York, 2000.

APPENDIX A LASERVAPEN PÅ TAKTISK FLYGANDE PLATTFORM

Bakgrund

En intressant tillämpning för ett laservapen är taktiska uppdrag installerade på mindre flygande plattformar (jmf. med ABL-systemet). Tanken är att minska lasersystemet och utnyttja några av delsystemen ingående i ett flygburet laservapen utvecklat för att bekämpa interkontinentala robotar. Vid taktiska tillämpningar måste hela systemet ”skalas ned” beträffande vikt, volym och komplexitet. I ett första steg kan man tänka sig ett taktiskt system installerat på en större plattform liknande C-130. I ett framtida scenario (utblick mot år 2020) studeras konceptet att implementera ett snarlikt system, dock ytterligare förminskat, på taktiska jetflygplan. Eftersom den tekniknivån som krävs för HEL på ett taktiskt jetflygplan anses som mycket hög, där delar av nödvändig teknologi ej är utvecklad, diskuteras endast ett laservapen som kan installeras på en större flygande plattform i det här appendixet. Primära tillämpningar för ett taktiskt laservapen inkluderar bekämpning av olika typer av robotar t.ex. lågt flygande kryssningsmissiler. Andra tillämpningar kan vara mot olika typer av EO-sensorer monterade i LV-ställningar på marken, avfyra raketer, EO-sikten, radomer etc. Nya tillämpningar där laservapen teknikens fördelar kan användas inkluderar precisionsbekämpning av mål där liten lateral skada accepteras t.ex. i tätbebyggt område. Ett taktiskt laservapen kan här användas för att skada kommunikationssystem, fordon, energiförsörjningssystem etc. En annan fördel är att lasertekniken är smygande och en överraskningseffekt erhålls.

Tidsperiod: Försökssystem 2005-2015. Operativa system införda ca. 2015.

Tillämpningar Exempel på tillämpningar för ett flygbaserat taktiskt laservapen

Tillämpningar	Kommentar
Offensiva	
Kryssningsmissiler	Skada sensorer, drivenhet
Bekämpa UAV:er	Skada i EO-sensorer, skada lätta mekaniska strukturer
LV-ställningar på marken	Slå ut sikten, EO-sensorer, förstörande verkan - slå ut detektor, , tidig upptäckt, graderad verkan av intresse - bländning av sikten/EO-sensorer
Fordon	Punktera däck, förstöra lyktor, bränsletankar, etc.
Lättare flygplan, hkp	EO-sensorer, frosta hkp-huvar
Skada energiförsörjning, kommunikation	Vilseledning, irritation och överaskningsförberedande
Starta eldhärdar	Lång avståndsförmågan, vilseledning/överraskning.
Defensiva	
Skydd mot robotar (SAM)	Utökad DIRCM funktion mot alla typer av hotrobotar, skada detektor i våglängdsbandet, skada på dom, UV-filament – bredbandig störning
Förstöra minor och ammunition	
Spaning och måligenkänning	Okända flygplan, UAV etc. Utnyttja passiv optik + ev. laserbelysning, speciellt under mörker.
Belysare	Belysning av stridfält etc., Ger extra belysning för TV och bildförstärkarsystem så att hög upplösning kan utnyttjas på natten.
Kommunikation	Långa räckvidder möjliga (BVR ?). Problem att modulera laser vid hög lasereffekt.

Teknisk beskrivning

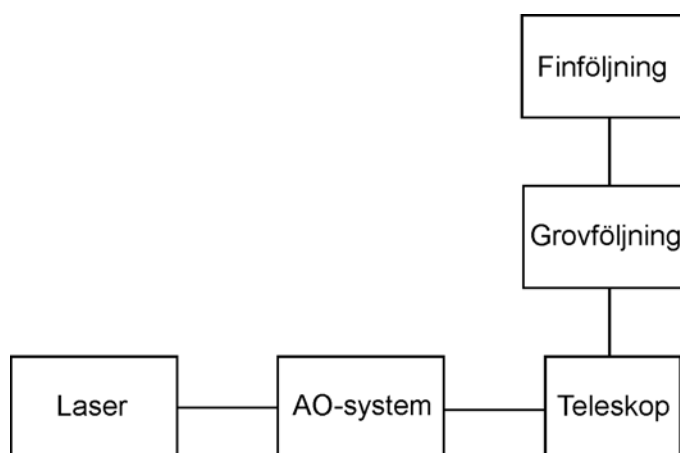
Systemet monteras på fordon och består av följande större delsystem:

1. Lasersystemet som ger verkan i målet.
2. Pek- och följesystem. Detta delsystem styr strålen så att den följer målet och fokuseras på samma fläck under bekämpningstiden (1-4 sekunder) för att nå optimal verkan.
3. C³I systemet som består av eldledningsradar (kan placeras på annan plattform), eventuellt IR spanare, system som verifierar målet samt att målet är bekämpat. Dessutom igår kommunikationslänkar till andra enheter samt ett operatörs-gränssnitt.

Ett mål upptäcks av radar eller IR spanare. Lasersystemet invisas-en lågeffektslaser slås på och avbildar målet med mycket hög upplösning för målidentifiering samt träffpunkt-sval. Detta sker förlopp tar mindre än en sekund-därefter slås verkanslasersystemet på. En

adaptiv loop optimerar strålningstätheten i målet. Målet följs via en IR kamera alternativt en grindad bild från den aktiva lågeffekslasern som ligger på en annan våglängd jämfört med verkanslasern. Det är viktigt att verkanslasern ligger på samma fläck under bekämpningsfasen för att optimalverkan skall ske. Detta sker via IR bilden eller den grindade bilden som dessutom används för verifiering av målbekämpningen. Ett bekämpningsförlopp tar 1-4 sekunder från målfattning.

Systemet monteras på en flygande plattform och består av följande större delsystem, se figur A1.



Figur A1. Schematisk skiss av delsystem i ett flygbaserat taktiskt laservapen

□

Tekniska data

Teknologi	Kritiska parametrar
HEL-kemisk, COIL Fasta tillståndslaser	Effekt > 50 kW kontinuerlig, Energi > 1 kJ för pulsad, $\lambda = 1.3, 2.8 \mu\text{m}$ Effekt > 20 kW, Energi > 1 kJ, $\lambda = 0.8-1.5 \mu\text{m}$
Materialteknik	Optikkomponenter, AR-skikt, optisk kvalitet, skadetrösklar, kylning etc.
Målföljning, strålkontroll	Riktpunktsfel* < 0.25-10 μrad , stråldiameter vid mål
Strålstyrning	Pekjitter* < 0.25-10 μrad , hastighet > 0.5 rad/s, acceleration > 5 rad/s ²
Målväxling	< 2 s, beror på typ av mål (verkanseffekt)

Invisning och grovföljning

Grovinvisning sker via robotvarnare eller radarspaning. Systemet kan även inkludera en skannande spaningslaser som används för optikspaning. Grovföljning sker med passiva avbildande system som TV-kamera, bildförstärkare eller termisk IR-kamera. Invisning- och grovföljning av mål bör ha en noggrannhet på 1° eller bättre. En IR-spanare kan också användas för att varna och invisera mål.

Finföljning

Finföljning sker passivt med högupplösande IR-kamera (512x512 pixlar, 400 Hz bilduppdateringsfrekvens). Konventionella målföljningsalgoritmer som korrelation eller centroid utnyttjas. Om mottagaroptiken har en apertur på 30 cm erhålls en upplösning på 25-30 μ rad om vi antar ett f-tal som är mellan 1-2 och en pixelstorlek ~ 10 -20 μ m.

Med en aktiv finföljning, dvs med belysningslaser som utnyttjar retroreflexinformation kan en högre upplösning erhållas. Finföljningssystemet kräver adaptiv optik för att kompensera för externa störningar.

Målidentifiering, träffpunktsval och träffpunktsföljning

För målidentifiering krävs hög upplösning där varje pixel ska motsvara ca. 2-3 cm. Om verkansavståndet är 5 km krävs här en upplösning på 5 μ rad. Vid aktiv belysning kan tillräckligt upplösning erhållas under förutsättning att stor optikapertur används samt att externa störningar kompenseras med adaptiv optik. Detektor för belysningssystemet väljs med avseende på laservåglängd.

Verkanslaser inklusive teleskop

Laser:

Diodpumpad fastatillståndslaser,	$\lambda = 1 \mu\text{m}.$
COIL-laser våglängd	$\lambda = 1,315 \mu\text{m}$
Medeleffekt	$> 100 \text{ kW}$
Strehl	$S > 0.4$ (strålkvalité)

Teleskop:

Spegelteleskop med adaptiv optik för korrektion	
Aperturdiameter	0.3-0.6 meter.
Följejitter:	$< 1 \mu\text{rad}$
Peknoggrannhet:	$< 2 \mu\text{rad}$

Stråldiameter i målet

3-5 cm på max avstånd, 5 km.

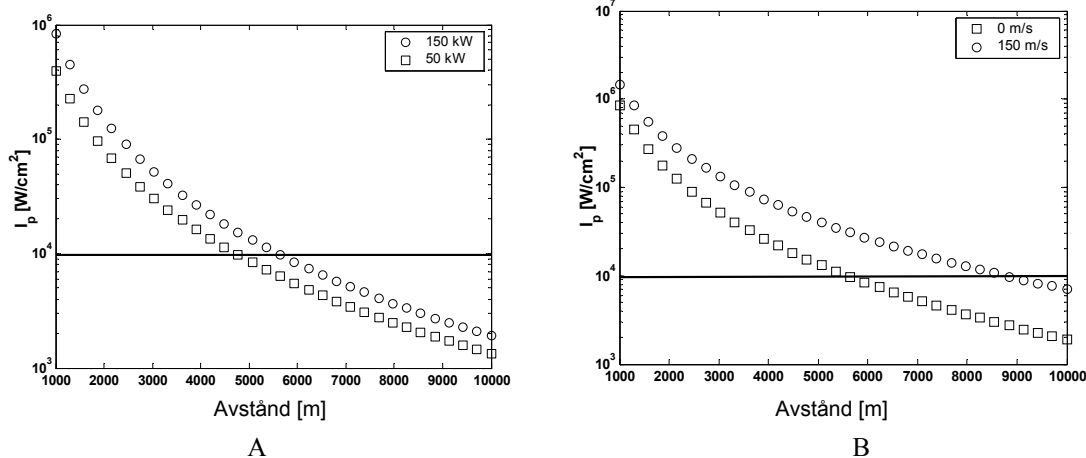
Effektthet i målet

4-10 kW/cm² för klar sikt och 5 km avstånd

Tabell A1 Parametrar – spelkort för ett flygbaserat taktiskt laservapen

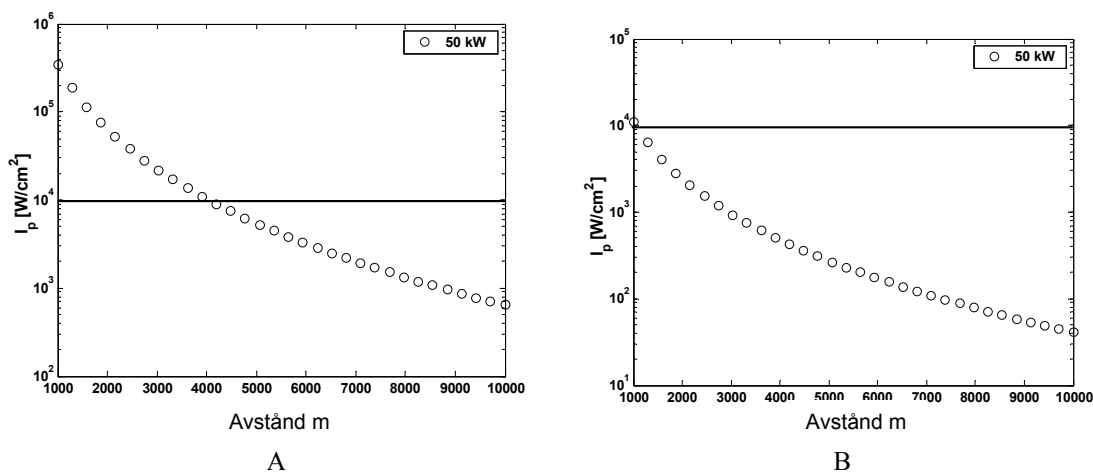
Parameter	Värde	Kommentar
Lasereffekt - P_L	50-250 kW	Medeleffekt hos lasersystemet
Våglängd - λ	1,0 / 1,315 μm	Laservåglängd
Apertur - D	30-60 cm	Sändarapertur hos utgående stråle
Stråljitter - σ_j	1-2 μrad	Mekaniskt stråljitter
Stråldrif - σ_w	0.5-1 μrad	Stråldrif från riktpunkt
Spridning - σ	0.07 / 0.03 km^{-1}	Dämpningskoefficient pga spridning i aerosoler/molekyler, antas vara konstant längs strålbanan
Absorption - α	0.03/0.02 km^{-1}	Dämpning pga molekylabsorption i atmosfären, antas vara konstant längs strålbanan
Turbulens - C_n^2	$10^{-13} - 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$	Integrerade värden längs strålbanan, exponentiell modell för höjdberoende $C_n^2 \propto h^{-\frac{4}{3}}$
Vindhastighet - V_w	1-10 m/s	
Strålbana - L	5-10 km	Sned bana, h_p höjd plattform, h_t höjd mål
Målshastighet - V_t	1 – 300 m/s	

Två olika scenarion beaktas i beräkningarna, en horisontell strålbana på 1 km höjd samt en lutande strålbana där plattformen befinner sig på 1 km höjd och målet nära marken. Strålbansens längd varierar från 3 till 10 km. Den totala extinktion antas vara $\sigma_{\text{tot}} = 0.05$ eller 0.1 km^{-1} . Beräkningarna bygger på en analytisk modell utvecklad av Breaux vilken inkluderar uppvärmningseffekter i atmosfären, turbulens, spridning, bangeometri samt diffraktion⁴⁴. I exemplen nedan visas några enkla beräkningar för att uppskatta prestanda hos ett flygburet taktiskt laservapen. Kontinuerlig laser har antagits.



Figur A2 A) Toppintensitet som funktion av avstånd för två olika lasereffekter. B) Topp intensitet vid målet som funktion av avstånd vid två olika målshastigheter (lasereffekt 150 kW). Följande parametrar användes: $\lambda = 1,315 \mu\text{m}$, $D = 60 \text{ cm}$, $\sigma_j = 1 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$, $\sigma_w = 1 \cdot 10^{-6}$, $\sigma = 0.03 \text{ km}^{-1}$, $\alpha = 0.02 \text{ km}^{-1}$, $r_0 = 74 \text{ cm}$, $V_t = 0 \text{ m/s}$, $V_w = 5 \text{ m/s}$, $h_p = 1 \text{ km}$, $h_t = 10 \text{ m}$.

I figur A2 visas några exempel på prestanda för ett flygburet taktiskt laservapen med prestanda enligt tabell A1. Den heldragna linjen indikerar effekttätheten 10 kW/cm^2 vid målet vilken bedöms vara tillräckligt i de flesta fall för att inducera strukturförstörande verkan. Med lasereffekter på 150 kW (30 cm sändarapertur) erhålls ett verkansavstånd på ca. $5,5 \text{ km}$ då målet står stilla samt $8,5 \text{ km}$ då målet rör sig med 150 m/s (följning orsakar kylning av atmosfären). I det här exemplet var absorptionen och spridningsbidragen små pga. att en sned strålbana antogs där plattformen befann sig på 1 km höjd och målet nära marken.



Figur A3 A) Toppintensitet som funktion av avstånd vid högre extinktion ($\sigma_{\text{tot}} = 0,1 \text{ km}^{-1}$). B) Samma som A men $\sigma_j = 10 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$, $\sigma_w = 5 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$. Följande parametrar användes: $\lambda = 1,315 \mu\text{m}$, $D = 60 \text{ cm}$, $\sigma_j = 1 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$, $\sigma_w = 1 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$, $\sigma = 0,07 \text{ km}^{-1}$, $\alpha = 0,03 \text{ km}^{-1}$, $r_0 = 40 \text{ cm}$, $V_t = 0 \text{ m/s}$, $V_w = 5 \text{ m/s}$, $h_p = 0,5 \text{ km}$, $h_t = 10 \text{ m}$.

I Figur A3 har förlusterna i atmosfären antagits vara större. Räckvidden har då reducerats till ca. 4 km när en lasereffekt på 50 kW används. I figur A3B är jitterbidraget från systemet inte försumbart vilket direkt resulterar i reducerad prestanda och gränsen 10 kW/cm^2 erhålls på 1 km . Vid beräkningarna ovan har en stor sändarapertur antagits. Om aperturen reduceras till $D = 30 \text{ cm}$ erhålls effekttätheterna enligt följande tabell vid $3,5$, och 10 km (övriga parametrar enligt Figur A3A).

Avstånd [km]	Intensitet vid mål [W/cm^2]
3	7,4
5	1,8
10	0.25

Vid en reduktion av aperturen sjunker prestanda p.g.a. möjligheterna att fokusera strålen minskas. Strålens storlek i fokus kan skrivas som $w \propto \frac{\lambda f}{D}$ där f är fokuseringsavståndet.

Kostnaderna för systemet ökar dock avsevärt när aperturen ökas

Verkansverifiering:

Passiva eller aktiva avbildande följesystem kan användas för verkansverifiering.

Prestanda

Se överslagsberäkningar ovan.

Uthållighet, energiförsörjning:

Laserkällan bör vara sluten dvs. rening av gaser om en kemisk COIL-laser används. Alternativt kan man tänka sig ett begränsat magasin på ca. 10 skott där använda gaser släpps ut i atmosfären. Vid tomt magasin måste återfyllning av gaser ske på marken.

Om en fastatillståndslaser som diodpumpas används krävs elektrisk energi som energikälla för att driva laserdioderna. Här används lämpligtvis någon av de batteritekniker som har beskrivits ovan.

Ögonsäkerhet:

Glintreflexer från en COIL/fastatillståndslaser måste beaktas på korta verkansavstånd.

Vikt och volym:

Lasersystemet uppskattas uppta en volym på 10 m^3 och väga ca. 5000 kg. Systemet ska få plats i ett större transportflygplan av typen C-130 eller liknande.

Kostnad: uppskattning ~50-100 Mkr/system.

APPENDIX B FORDONSBUREN LV LASER.

Bakgrund

Man kan tänka sig att ett fordonsmonterat laservapen har två syften - ett defensivt och ett offensivt. Tabellen ger exempel på sådana. Som bas för antaganden har vi antagit ett relativt måttligt räckviddskrav mot robotar och andra mål, 2-3 km. Detta för att vi inte skall landa på ett alltför komplext och stort system. Avsikten är att systemet kan inrymmas i ett stridsfordon, t ex ett stridsfordon 90 chassi eller ett fordon typ HMMW. Tekniska bedömningar om realiserbarhet baseras på beskrivning av US Armys HELSTAR program.

Tidsperiod: Försökssystem 2005-2010. Operativa system införda ca 2015.

Tillämpningar

Tillämpningar	Kommentar
<i>Defensiva</i>	
Skydd mot robotar, PV vapen, stridsdelar, raketer	Ett laservapenfordon bör skydda flera enheter - relevant för NBF-förmåga.
HKP/attackflyg bekämpning	HKP är ett mer relevant mål än attackflyg pga av bekämpningsavståndet. Stoppa ”självordbombsare” i fpl ?
Stridsfältbelysa	Göra natten till dag genom att utöka kapaciteten för TV och Night vision goggles (NVG).
Långräckviddig måligenkänning	Okända flygplan, UAV etc. Utnyttja passiv optik + ev. laserbelysning, speciellt under mörker.
Minröjning, oskadliggörande av oexploderad ammunition	Motiv för laser är snabbhet och precision.
<i>Offensiva</i>	
Bekämpning av UAV	Obemannade fpl med sprängmedel kan vara terroristvapen
Hitta och bekämpa optik över stora områden	Om man har tid kan scannande lågeffektssystem med bländförmåga ge liknande effekter. Laservapen medger stora momentana sökområden samt förstörande verkan på optik.
Punktera däck, på fordon	
Sätta eld på vissa objekt eller del av terräng-röka ut	Motivation för att använda laser för detta är avståndsförmågan, snabbhet, punktbekämpning och överraskning.
Punktbekämpa el- och telefonledningar, antenner, etc.	Ikke letal verkan vid terrorhot, internationella operationer

Teknisk beskrivning

Systemet monteras på fordon och består av följande större delsystem:

1. Lasersystemet som ger verkan i målet.
2. Pek- och följesystem. Detta delsystem styr strålen så att den följer målet och fokuseras på samma fläck under bekämpningstiden (1-4 sekunder) för att nå optimal verkan.
3. C³I systemet som består av eldledningsradar (kan placeras på annan plattform), eventuellt IR spanare, system som verifierar målet samt att målet är bekämpat. Dessutom igår kommunikationslänkar till andra enheter samt ett operatörsgränssnitt.

Figuren nedan kan illustrera ett tänkt system.



Figur B1. *Tänkbart fordonsburet laservapen. Källa Moellering¹.*

Ett mål upptäcks av radar eller IR spanare. Lasersystemet invisas-en lågeffektslaser slås på och avbildar målet med mycket hög upplösning för målidentifiering samt träffpunkt-sval. Detta sker förlopp tar mindre än en sekund-därefter slås verkanslasersystemet på. En adaptiv loop optimerar strålningstätheten i målet. Målet följs via en IR kamera alternativt en grindad bild från den aktiva lågeffektslasern som ligger på en annan våglängd jämfört med verkanslasern. Det är viktigt att verkanslasern ligger på samma fläck under bekämpningsfasen för att optimalverkan skall ske. Detta sker via IR bilden eller den grindade bilden som dessutom används för verifiering av målbekämpningen. Ett bekämpningsförlopp tar 1-4 sekunder från målfattning.

□

Tekniska data

Invisning och grovföljning:

E radar med en invisnings och följeno-grannhet under 1 grad. Alternativt en IR spanare med ca. 1 mrad följeprestanda.

Finföljning:

IR sensor med ca 25 μ rad upplösning. På 5 km avstånd motsvarar detta 0.13 meter.
Korelations- eller centriodföljning.

IR sensor InSb eller motsvarande med en array om 512*512 element. Bilduppdatering 400 Hz. Mottagaroptik av spegeltyp, diameter 20-30 cm.

Målidentifiering-träffpunktsval och träffpunktsföljning:

Detta kräver ett välupplöst mål i klassen 2-3 cm. Om vi antar 5 km som det största avstånd där ovanstående funktioner skall fungera bör upplösningen vara ca 5 μ rad. Detta låter sig göras t ex med laserbelysning vid 1 eller 1.5 μ m och en grindad bildförstärkare alternativt en lågljus TV eller en 3 D fokalplanearray. Turbulensinflytande vid sneda banor är begränsat och dessutom kan adaptiv optik kompensera för atmosfärisk oskärpa. Optikdiametern och brännvidden är stora så mottagaren inklusive bildförstärkarröret kommer inte att begränsa upplösningens förmågan. Mottagaroptiken kan sammanfalla med sändaroptiken för verkanslaserstrålen.

Lågeffektlaser: > 100 mJ/puls, prf > 100 Hz, pulslängd 10 ns. Om 3 D FPA finns tillgänglig krävs pulslängd < 1 ns för att utnyttja upplösning i cm nivå i alla dimensioner. Vi utnyttjar en konservativ uppskattning av termisk distorsion genom att anta en kontinuerlig laserstråle.

Verkanslaser inklusive teleskop:

Diodpumpad fasta-tillståndslaser, våglängd 1 μ m.

Alternativt fiberlaserrray, våglängd 1.5 μ m.

Uteffekt >100 kW (medel)

Pulsfrekvens 200 Hz

Pulsenergi: > 500 J

Pulslängd: < 1 ms

Strålkvalitet: Strelkvot >0.4

Sändarteleskop: Spegelteleskop med adaptiv för korrektion, diameter 0.5 meter.

Följejitter: <1-5 μ rad

Peknoggrannhet: <1-5 μ rad

Stråldiameter i målet: 3-5 cm på max avstånd, 5 km.

Effekttäthet i målet: 4-10 kW/cm² för klar sikt och 5-10 km avstånd.

Markbaserat laservapen som pekar i två banor:

1/ Mark till marknära mål , avstånd 1-5 km, elevationsvinkel 10 mrad, effektiv tvärvind: 5-100 m/s

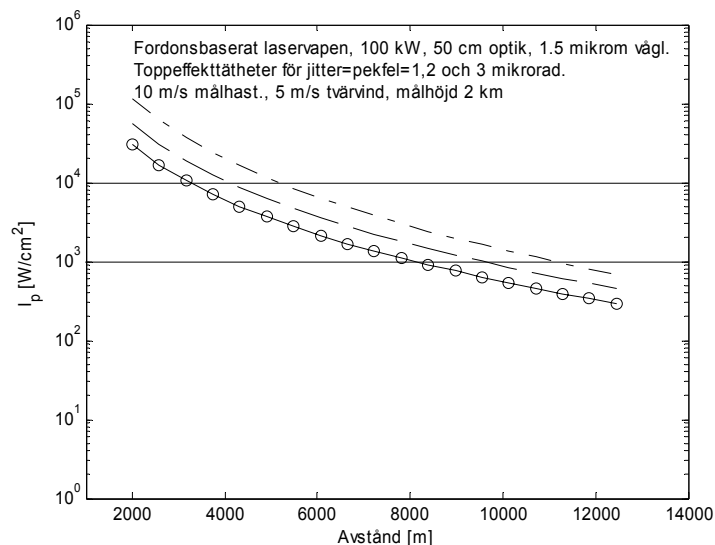
2/ Mark till mål med 60 graders elevationsvinkel, effektiv tvärvind: 10-150 m/s.

Tabell B1 Parametrar – spelkort för ett fordonsbaserat taktiskt laservapen

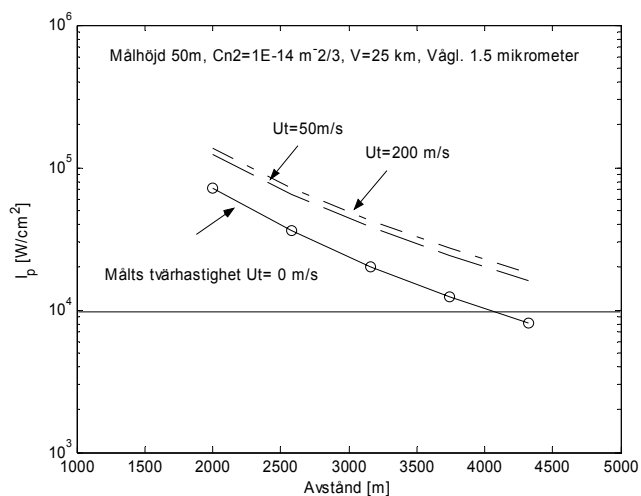
Parameter	Värde	Kommentar
Lasereffekt - P_L	> 100 kW	Medeleffekt hos lasersystemet
Våglängd - λ	1,5 μm	Laservåglängd
Apertur - D	50 cm	Sändarapertur hos utgående stråle
Stråljitter - σ_j	1-5 μrad	Mekaniskt stråljitter
Stråldrif - σ_w	1-5 μrad	Stråldrif från riktpunkt
Spridning - σ vid 25 km sikt	0.04	Dämpningskoefficient pga spridning i aerosoler/molekyler, antas vara konstant längs strålbanan. Varierar med visuell sikt.
Absorption - α	0.03 / 0.02	Dämpning pga molekylabsorption i atmosfären, antas vara konstant längs strålbanan
Turbulens - C_n^2	$10^{-13} - 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$	Integrerade värden längs strålbanan, exponentiell modell för höjdberoende $C_n^2 \propto h^{-\frac{4}{3}}$
Vindhastighet - V_w	1-10 m/s	Tvårs strålbanan
Strålbana - L	0-20 km	1/ Horisontell 5 m över havet Sned bana 60 graders elevation
Målshastighet - V_t	1 – 200 m/s	Hastighet tvårs strålbanan

Figur B1 visar exempel på maximala målirradianser för målhöjd 2 km samt olika pekfel/pekjitter. Vi har antagit 50 cm optik och 100 kW uteffekt samt låga tvärhastigheter för vind och målshastighet. Verkansavstånd mellan 3-4 km kan uppnås under klart väder. Ungefär samma verkansavstånd erhålles för målhöjden 50 meter om man reducerar markturbulensen från $1\text{E-}13 \text{ m}^{-2/3}$ till $1\text{E-}14 \text{ m}^{-2/3}$ (figur B2). Om god verkan skall erhållas under större turbulensinflytande måste adaptiv optik användas.

Uppskattade räckvidder för olika visuell sikt och fall illustreras i tabellen nedan. Notera att pga envägsutbredning blir verkansräckvidden marginellt beroende av visuell sikt (läs spridningsförluster i aerosoler). En rigorös behandling bör innefatta aerosolabsorption och överföring av värme från de uppvärmda aerosolerna till luften



Figur B1. Fordonsburet laservapen-toppirradianser som funktion av avstånd för målhöjden 2 km och olika peckfel och pekjitter. Följande parametrar användes: $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$, $D = 50 \text{ cm}$, $\sigma_j = 1(2,3) \cdot 10^{-6} \text{ rad}$, $\sigma_w = 1(2,3) \cdot 10^{-6}$, $\sigma = 0.04 \text{ km}^{-1}$ (25 km sikt), $\alpha = 0.02 \text{ km}^{-1}$, $V_t = 10 \text{ m/s}$, $V_w = 5 \text{ m/s}$, $h_p = 2 \text{ m}$, $h_t = 2000 \text{ m}$. Turbulens marknivånivå $C_n^2 = 1E-13 \text{ m}^{-2/3}$.



Figur B2. Fordonsburet laservapen-toppirradianser som funktion av avstånd för målhöjden 50 m. Följande parametrar användes: $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$, $D = 50 \text{ cm}$, $\sigma_j = 1(2,3) \cdot 10^{-6} \text{ rad}$, $\sigma_w = 1(2,3) \cdot 10^{-6}$, $\sigma = 0.04 \text{ km}^{-1}$ (25 km sikt), $\alpha = 0.02 \text{ km}^{-1}$, $V_t = 0-200 \text{ m/s}$, $V_w = 5 \text{ m/s}$, $h_p = 2 \text{ m}$, $h_t = 50 \text{ m}$. Turbulens marknivånivå $C_n^2 = 1E-14 \text{ m}^{-2/3}$.

Tabell B1: Uppskattad räckvidd som funktion av visuell sikt. Tröskelirradians 10 kW/cm².

Visuell sikt km	Låg elevation (km) Markturb. 1E-14 m ^{-2/3}	Hög elevation (km) Markturb. 1E-13 m ^{-2/3}
1	2.2	2.3
3	3.4	3.7
5	3.7	4.3
10	4.3	4.9
25	4.7	5.3

Verkansverifiering:

Skär med IR kamera och/eller TV kamera.

Prestanda:

Tid från målupptäckt till bekämpning inleds: 1-2 sekunder

Tid för bekämpning: 1-4 sekunder beroende på avstånd och måltyp

Tid för målväxling: < 1 sekund.

Verkansavstånd: 2-4 km, mot mjukare mål upp till 5-6 km.

Uthållighet, energiförsörjning:

Batteriförsörjning, batterier laddas med dieselmotor på fordonet eller kommer från annan enhet.

Batterimagasin: 1 MJ

Antal mål per magasin: ca 10

Antal magasin per fordon: 3

Uppladdningstid, 10 min per magasin

Ögonsäkerhetsproblematik:

Inga nämnvärda för diffusa målreflexer om 1.5 µm våglängd används

Vikt och volym:

Lasersystem: 4-5 ton, 5-7 m³.

Kostnad: 50-100 Mkr/system ?

¹ John Moellering, Lieutenant General, U.S. Army, BEYOND TRANSFORMATION
THE CASE FOR ARMY TACTICAL LASERS, www.ampresearch.com

APPENDIX C. FARTYGSBURET LASERVAPEN.

Bakgrund

Laservapen kan komma att fylla en viktig roll för skydd av fartyg främst mot snabba och snabbt manövrerande robotar. Fartyg kommer även att uppträda kustnära, inte minst i internationella operationer vilket adderar en ny hotbild i form av attackvapen, PV vapen etc. För dessa hot sammanfaller i mångt och mycket kraven på ett fordonsmonterat och ett fartygsmonterat laservapen.

Tidsperiod: Försökssystem 2010-2015. Operativa system införda ca 2020.

Tillämpningar:

Tillämpningar	Kommentar
<i>Defensiva</i>	
Skydd mot robotar, PV vapen, stridsdelar, raketer	Ett laservapenfordon bör skydda flera enheter - relevant för NBF-förmåga.
HKP/ attackflyg bekämpning	HKP är ett mer relevant mål än attackflyg pga av bekämpningsavståndet.
Långräckviddig måligenkänning	Okända flygplan, UAV etc. Utnyttja passiv optik + ev. laserbelysning, speciellt under mörker.
Stoppa terrorister i snabba båtar	Ökande hot, speciellt med fartyg i hamn.
<i>Offensiva</i>	
Bekämpning av UAV	Obemannade fpl med sprängmedel kan vara terroristvapen
Hitta och bekämpa optik över stora områden – t ex vid ingång mot okänd kust.	Om man har tid kan scannande lågeffektssystem med bländförmåga ge liknande effekter. Laservapen medger stora momentana sökområdet samt förstörande verkan på optik.
Sätta eld på vissa objekt eller del av terräng- ”röka ut”	Motivation för att använda laser för detta är avståndsförmågan, snabbhet, punktbekämpning och överraskning.

Teknisk beskrivning

Systemet monteras på fordon och består av följande större delsystem:

1. Lasersystemet som ger verkan i målet.
2. Pek- och följesystem. Detta delsystem styr strålen så att den följer målet och fokuseras på samma fläck under bekämpningstiden (1-4 sekunder) för att nå optimal verkan.
3. C³I systemet som består av eldledningsradar (kan placeras på annan plattform), eventuellt IR spanare, system som verifierar målet samt att målet är bekämpat. Dessutom igår kommunikationslänkar till andra enheter samt ett operatörs-gränssnitt.

Figuren nedan kan illustrera ett tänkt system.



Figur C1. Tänkbart fartygsmonterat laservapen.

Ett mål upptäcks av radar eller IR spanare. Lasersystemet invids en lågeffektlaser slås på och avbildar målet med mycket hög upplösning för målidentifiering samt träffpunkt-sval. Detta sker förlopp tar mindre än en sekund-därefter slås verkanslasersystemet på. En adaptiv loop optimerar strålningstätheten i målet. Målet följs via en IR kamera alternativt en grindad bild från den aktiva lågeffektlasern som ligger på en annan våglängd jämfört med verkanslasern. Det är viktigt att verkanslasern ligger på samma fläck under bekämpningsfasen för att optimal verkan skall ske. Detta sker via IR bilden eller den grindade bilden som dessutom används för verifiering av målbekämpningen. Ett bekämpningsförlopp tar 1-4 sekunder från målfattning.

□

Tekniska data

Invisning och grovföljning:

E radar med en invisnings och följeno-grannhet under 1 grad. Alternativt en IR spanare med ca. 1 mrad följeprestanda.

Finföljning:

Skär med IR sensor. Om mottagaroptiken har en apertur på 30 cm erhålls en upplösning på 25-30 μ rad om vi antar ett f-tal som är mellan 1-2 och en pixelstorlek ~ 10 -20 μ m. På 5 km avstånd motsvarar detta 0.13 meter. Korrelations- eller centroidföljning.

IR sensor InSb eller motsvarande med en array om 512*512 element. Bilduppdatering 400 Hz. Mottagaroptik av spegeltyp, diameter 20-30 cm.

Målidentifiering-träffpunktsval och träffpunktsföljning:

Detta kräver ett välupplöst mål i klassen 2-3 cm. Om vi antar 20 km som det största avstånd där ovanstående funktioner skall fungera bör upplösningen vara ca 1 μ rad. Detta låter sig göras t ex med laserbelysning vid 1 eller 1.5 μ m och en grindad bildförstärkare alternativt en lågljus TV eller en 3 D fokalplanearray. Adaptiv optik kompensera för atmosfärisk oskärpa. Optikdiametern och brännvidden är stora så mottagaren inklusive bildförstärkarröret inte kommer att begränsa upplösningens förmåga. Mottagaroptiken kan sammanfalla med sändaroptiken för verkanslaserstrålen.

Lågeffekt laser: > 500 mJ/puls, prf > 100 Hz, pulslängd 10 ns. Om 3 D FPA finns tillgänglig krävs pulslängd < 1 ns för att utnyttja upplösning i cm nivå i alla dimensioner.

Verkanslaser inklusive teleskop:

Fastatilståndslaser Våglängd 1.06 μ m.
 Alternativ 1 Fiberlaserrray, våglängd 1.5 μ m.
 Alternativ 2: Fri elektronlaser avstämd till 1-1.5 μ m.
 Alternativ 4: COIL laser vid 1.315 μ m.
 Uteffekt >1 MW (medel)
 Pulsfrekvens 200 Hz
 Pulsenergi: > 5000 J
 Pulslängd: < 1 ms
 Strålkvalitet: Strelkvot >0.4

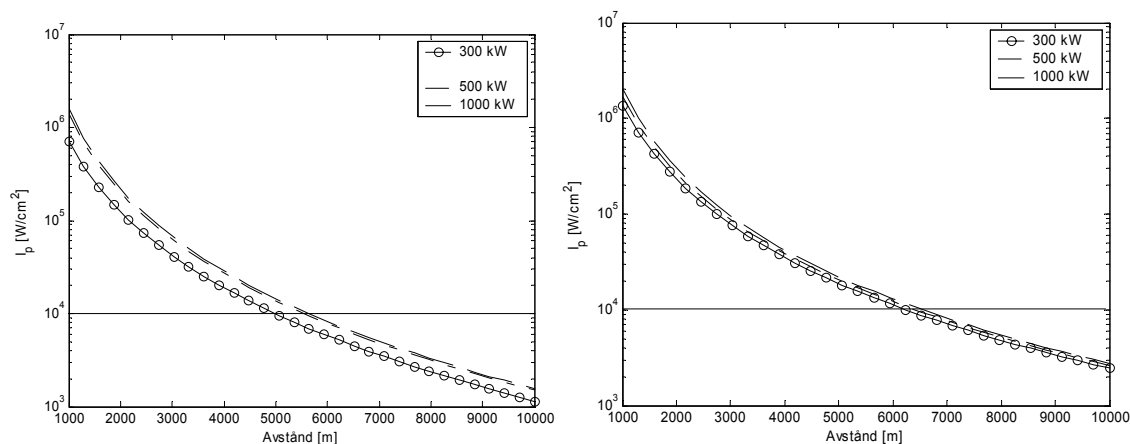
Sändarteleskop: Spegelteleskop med adaptiv för korrektion, diameter 0.7 meter.
 Följejitter: <1-2 μ rad
 Peknoggrannhet: <2 μ rad
 Stråldiameter i målet: ca 5 cm på max avstånd, 20 km.
 Effekttäthet i målet: 1-10 kW/cm² för klar sikt och upp till 20 km avstånd.

Fartygsbaserat laservapen som pekar i två banor:

- 1/ Fartyg-sea skimmer mål , avstånd 1-20 km, elevationsvinkel 0 mrad, effektiv tvärvind: 5 m/s
- 2/ Fartyg till mål (fpl, UAV) med 60 graders elevationsvinkel, effektiv tvärvind: 150 m/s

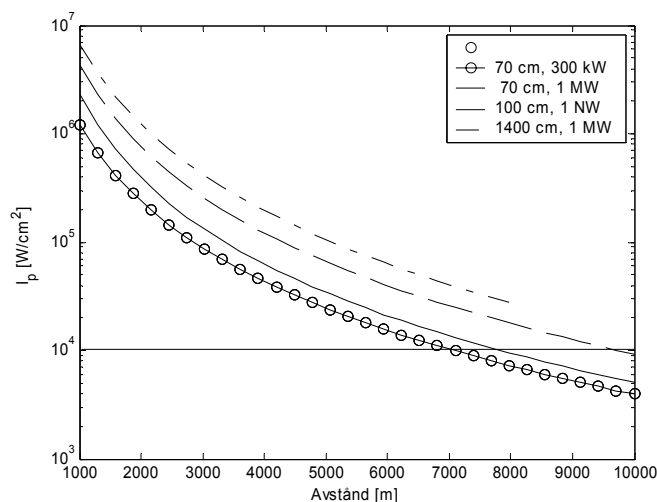
Tabell C1 Parametrar – spelkort för ett fartygsbaserat taktiskt laservapen

Parameter	Värde	Kommentar
Lasereffekt - P_L	> 100-1000 kW	Medeleffekt hos lasersystemet
Våglängd - λ	1,06 / 1,5 μm /2,8 μm	Laservåglängd
Apertur - D	70 cm	Sändarapertur hos utgående stråle
Stråljitter - σ_j	1-2 μrad	Mekaniskt stråljitter
Stråldrif - σ_w	1-2 μrad	Stråldrif från riktpunkt
Spridning - σ vid 25 km sikt	0.07/0.04/	Dämpningskoefficient pga spridning i aerosoler/molekyler, antas vara konstant längs strålbanan. Varierar med visuell sikt.
Absorption - α	0.03	Dämpning pga molekylabsorption i atmosfären, antas vara konstant längs strålbanan
Turbulens - C_n^2	$10^{-13} - 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$	Integrerade värden längs strålbanan, exponentiell modell för höjdberoende $C_n^2 \propto h^{-4/3}$
Vindhastighet - V_w	1-10 m/s	Tvårs strålbanan
Strålbana - L	0-20 km	1/ Horisontell 5 m över havet Sned bana 60 graders elevation
Målhastighet - V_t	1 – 300 m/s	Hastighet tvärs strålbanan



Figur C2. Toppirradianser I_p som funktion av avstånd. T.v. I_p som funktion av avstånd av tre olika lasereffekter (300-1000 kW) och 1 μm våglängd. T.h. motsvarande för 1.5 μm . Följande parametrar användes: $\lambda = 1,06$ (1.5) μm , $D = 70$ cm, $\sigma_j = 1 \cdot 10^{-6}$ rad, $\sigma_w = 1 \cdot 10^{-6}$, $\sigma = 0.07$ (0.04) km^{-1} (25 km sikt), $\alpha = 0.03$ (0.02) km^{-1} , $r_0 = 33$ (54) cm, $V_t = 0$ m/s, $V_w = 5$ m/s, $h_p = 5$ m, $h_t = 5$ m. Turbulens nivå $C_n^2 = 1\text{E-}16 \text{ m}^{-2/3}$.

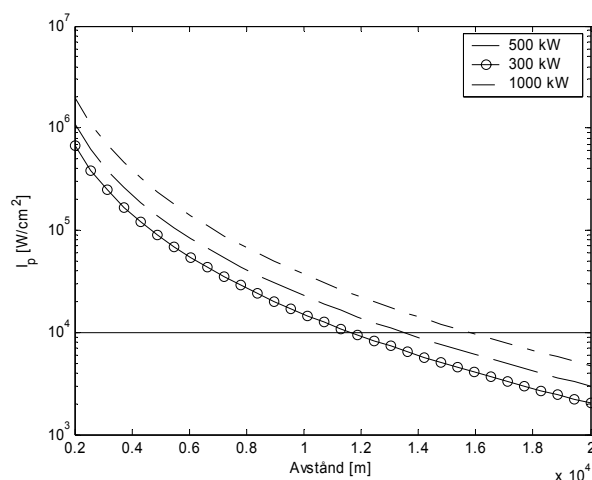
Figur C2 visar toppirradianser för 1 resp 1.5 μm våglängd och 70 cm apertur. Mål och laservapen på 5 meters höjd. Notera att beräkningarna skett under antagandet att ingen turbulenskompensation via adaptiv optik skett. Detta gör att turbulensinflytandet är starkt och för nivåer större än nivå $C_n^2 = 1\text{E-}16 \text{ m}^{-2/3}$. Effektiva verkansavstånd verkar ligga mellan 5-6 km oberoende av lasereffekt mellan 300-1 MW.



Figur C3. Toppirradians I_p som funktion av avstånd. T.v. I_p som funktion av avstånd av tre olika lasereffekter (300-1000 kW) och $2.8 \mu\text{m}$ våglängd. Följande parametrar användes: $\lambda = 1,06 (1.5) \mu\text{m}$, $D = 70 \text{ cm}$, $\sigma_j = 1 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$, $\sigma_w = 1 \cdot 10^{-6}$, $\sigma = 0.07 (0.04) \text{ km}^{-1}$ (25 km sikt), $\alpha = 0.01 \text{ km}^{-1}$, $r_0 = 114 \text{ cm}$, $V_t = 0 \text{ m/s}$, $V_w = 5 \text{ m/s}$, $h_p = 5 \text{ m}$, $h_t = 5 \text{ m}$. Turbulens nivå $C_n^2 = 1\text{E-}16 \text{ m}^{-2/3}$.

Om vi ökar laservåglängden till $2.8 \mu\text{m}$ (DF laser) får turbulensen och blooming mindre inverkan och högre irradiansen kan genereras, figur C3. Här synes verkansavstånd över 10 km kunna erhållas.

I fallet med flygande mål på hög höjd (attackfpl med laserstyra vapen t ex) är situationen betydligt gynnsammare beträffande atmosfärsinverkan. Målhastigheten gör att man får en effektiv tvärvind som kyler laserstrålens uppvärmnings av atmosfären och motverkar blooming. Dessutom är turbulensinflytande marginellt trots en hög turbulensnivå vid havsytan antagits.



Figur C4. Toppirradians I_p som funktion av avstånd. T.v. I_p som funktion av avstånd av tre olika lasereffekter (300-1000 kW) och $2.8 \mu\text{m}$ våglängd. Följande parametrar användes: $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$, $D = 70 \text{ cm}$, $\sigma_j = 1 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$, $\sigma_w = 1 \cdot 10^{-6}$, $\sigma = 0.0 \text{ km}^{-1}$ (25 km sikt), $\alpha = 0.02 \text{ km}^{-1}$, $r_0 = 650 \text{ cm}$, $V_t = 150 \text{ m/s}$, $V_w = 0 \text{ m/s}$, $h_p = 5 \text{ m}$, $h_t = \text{varierar längs } 60 \text{ graders elevation}$. Turbulens nivå $C_n^2 = 1\text{E-}13 \text{ m}^{-2/3}$.

Uppskattade effekttätheter för olika visuell sikt och fall illustreras i tabellen nedan. Visuell sikt ger inte så stor försämring som i laserradarfallet pga av att endast enkelvägspropagering är relevant för verkanslasern. Vi har antagit att vi kan försumma uppvärmningsinverkan via aerosol till luft.

Tabell C2: Uppskattat avstånd för tröskelirradiansen 10 kW/cm^2 i målet. Våglängd $1.5 \mu\text{m}$. Lasereffekt 500 kW , apertur 70 cm . Turbulens nivå $C_n^2=1\text{E-}16 \text{ m}^{-2/3}$.

Visuell sikt km	Låg elevation (km)	Hög elevation (km)
1	3.0	3.3
3	4.9	6.8
5	5.4	8.7
10	6.0	10.8
25	6.2	13.5

Turbulens havsnivå $C_n^2(1)=10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$, höjdvatagande $C_n^2(h)=C_n^2(1)*h^{-4/3}$ (motsvarar dagprofil).

Verkansverifiering:

Sker med IR kamera och/eller TV kamera.

Prestanda:

Tid från målupptäckt till bekämpning inleds: 1-2 sekunder

Tid för bekämpning: 1-4 sekunder beroende på avstånd och måltyp

Tid för målväxling: < 1 sekund.

Verkansavstånd: 3-7 km, mot mjukare mål upp 10-15 km.

Uthållighet, energiförsörjning:

Fartyget har 10 tals MW elektrisk energi tillgänglig.

Ev. kan svänghjul eller batterier användas för att lagra energi mellan laseravvändning.

Ögonsäkerhetsproblematik.

Reflexer från målet kan ge ögonskador på närliggande operatörer-kräver laservisir.

Vikt och volym:

Lasersystem: 10-15 ton, 10-15 m³.

Kostnad: 200 -400 Mkr/system ?

