

Atmosfärspåverkan på lasrar i telekrigstillämpningar

En översikt

CECILIA GULLSTRÖM, MATTIAS RAHM,
LARS SJÖQVIST, MARKUS HENRIKSSON



**Cecilia Gullström, Mattias Rahm, Lars Sjöqvist,
Markus Henriksson**

Atmosfärspåverkan på lasrar i telekrigstillämpningar

En översikt

Titel	Atmosfärspåverkan på lasrar i telekrigstillämpningar
Title	Atmospheric effects on lasers in electronic warfare
Rapportnr/Report no	FOI-R--4841--SE
Månad/Month	November
Utgivningsår/Year	2019
Antal sidor/Pages	69
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	Försvarsmakten
Forskningsområde	Telekrig
FoT-område	Telekrig
Projektnr/Project no	E72769
Godkänd av/Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Ledningssystem

Bild/Cover: Kollage av bilder från Försvarsmaktens bildbank

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI

Sammanfattning

På samma sätt som man vid användning av kinetiska vapen behöver ta hänsyn till gravitation, luftmotstånd och vind, så behöver man vid användning av laser ta hänsyn till partiklar i luften och varierande brytningsindex. Den här rapporten ger en populärvetenskaplig översikt avseende effekterna av olika atmosfärsfenomen på ett antal olika militära tillämpningar där man använder lasrar. Rapporten är uppbyggd med ett antal uppslagsord grupperade i olika nivåer där man kan klicka sig runt mellan olika textavsnitt. Rapporten är skriven med endast ett fåtal enkla matematiska samband, och beskriver endast kvalitativt vad som är effekten av olika väderfenomen.

Materialet är sammanställt i projektet Laser i telekrigstillämpningar inom Försvarmaktens samlingsbeställning (AT.9220816, Telekrig FOI 19).

Nyckelord: Laser, atmosfär, väder.

Summary

To predict the projectile trajectory from a kinetic weapon it is necessary to take into account gravity, air resistance and the wind. When using a laser important factors are instead particles in the atmosphere and refractive index variations. This report gives a popular science description of the effects of different atmospheric phenomena on some military applications of lasers. The report consists of a number of articles grouped in categories with hyperlinks in between. The report contains only a few simple mathematical formulas, with most descriptions of effects of different weather phenomena being purely qualitative.

Keywords: Laser, atmosphere, weather.

Innehållsförteckning

1.	Inledning	9
2.	Tillämpningar	10
2.1	Aktiv utbildning för hotidentifiering	10
2.2	Avståndsmätning	12
2.3	Fri optisk kommunikation	13
2.4	Laserbländning	14
2.5	Laserutpekning	16
2.6	Laservapen	18
2.7	Laservarnare	20
2.8	Ledstrålesystem	21
2.9	Lidar för beslutstöd	22
2.10	Optikspaning	23
2.11	Störning av målsökare	25
3.	Prestandapåverkande effekter	26
3.1	Dämpning och transmission	26
3.2	Hägring/ledskikt	27
3.3	Kontrast- och upplösningsförlust	28
3.4	Laserkorona – spritt ljus utanför strålen	29
3.5	Räckviddsförlust	30
3.6	Scintillationer	31
3.7	Strålavböjning	33
3.8	Strålbreddning	33
3.9	Strålvandring	34
3.10	Termisk blomning/Termisk distorsion	35
4.	Atmosfärs- och väderfenomen	36
4.1	Aerosoler	36
4.2	Atmosfärens struktur	38
4.3	Brytningsindex	39
4.4	Dammoln och sandstormar	41
4.5	Dimma	42
4.6	Dis	43
4.7	Dygnsvariationer	44
4.8	Inversionsskikt	46
4.9	Luftfuktighet	47
4.10	Moln	48
4.11	Nederbörd	49

4.12	Rökpolymer	51
4.13	Turbulens.....	52
4.14	Vind.....	54
5.	Fysikaliska processer	55
5.1	Absorption	55
5.2	Bakgrundsstrålning.....	57
5.3	Diffraction	58
5.4	Refraction - brytningsindexvariationer.....	59
5.5	Spridning	60
6.	Viktiga egenskaper för lasrar och mottagarsystem	61
6.1	Divergens.....	61
6.2	Pulslängd	63
6.3	Upplösning och synfält.....	64
6.4	Våglängd.....	65
Appendix A: Tabeller och förklaringar.....		66
A.1	Tabeller för partikelstorlekar	66
A.2	Exponentialfunktionen.....	67
Appendix B: Källor och fördjupande litteratur		68

1. Inledning

Lasersystem finns idag i några tillämpningar inom Försvarsmakten, till exempel avståndsmätare och laserutpekare för robotar och andra laserstyrda vapen. Dessutom finns laservarnare på några plattformar för att upptäcka fiendens användning av lasrar. Lasrar kan dock förväntas bli vanligare i framtiden, inte minst på grund av den civila teknikutveckling av lidarsystem som sker för att möjliggöra självkörande bilar. På den militära sidan är laservapen ett stort tema internationellt, med näraliggande tillämpningar som att skjuta ner UAV:er, bränna upp explosivämnen på marken och mer långsiktiga möjligheter som luftvärn avsett för kortare räckvidder.

Precis som att man vid avfyrning av ett vapen behöver ta hänsyn till hur gravitation, luftmotstånd och sidvind påverkar kulan så behöver man ta hänsyn till atmosfären vid användning av laser. I många väderförhållanden är försämringen av prestanda så liten att systemet fortfarande kan användas med full förmåga, men det finns också väderförhållanden när både vår egen och motståndarens laseranvändning försvåras avsevärt. Prestandapåverkan beror inte bara på vädret, utan även på systemets konstruktion. System för långa räckvidder som har smala laserstrålar påverkas oftast mer än system för korta räckvidder med en bred stråle (stor divergens). Här försöker vi ge en översikt över olika atmosfärs- och väderfenomen samt förklara hur de påverkar olika lasersystem. I generella termer beskrivs olika lasertillämpningar med förklaringar varför de är olika känsliga för atmosfärs- och väderpåverkan.

Texten är skriven på ett sätt så att den kan läsas av och vara till nytta för officerare, specialistofficerare och tekniker inom Försvarsmakten. Tanken är att rapporten ska fungera som en uppslagsbok där man börjar med önskad tillämpning och sedan klickar sig vidare via interna länkar för att förstå hur atmosfärsfenomen och väder påverkar prestanda. Det går dock givetvis också att läsa rapporten rakt igenom för att få en översikt av vilka effekter och fenomen som finns. Vill man fördjupa sin förståelse för olika effekter och fenomen rekommenderar vi att läsa vidare i referenserna.

Vi har försökt hålla en rimlig omfattning på rapporten, vilket samtidigt innebär att den inte blir särskilt detaljerad. Detta innebär att rapporten inte ger en fullständig beskrivning av hur ett visst system påverkas under alla väderförhållanden. FOI kan kontaktas för att få hjälp med specifika frågeställningar och en mer detaljerad analys vid behov.

Materialet är sammanställt i projektet Laser i telekrigstillämpningar inom Försvarsmaktens samlingsbeställning (AT.9220816, Telekrig FOI 19).

Tillämpningarna som tas upp är:

[Aktiv avbildning för hotidentifiering](#)

[Avståndsmätning](#)

[Fri optisk kommunikation](#)

[Laserbländning](#)

[Laserutpekning](#)

[Laservapen](#)

[Laservarnare](#)

[Ledstrålesystem](#)

[Lidar för beslutsstöd](#)

[Optikspaning](#)

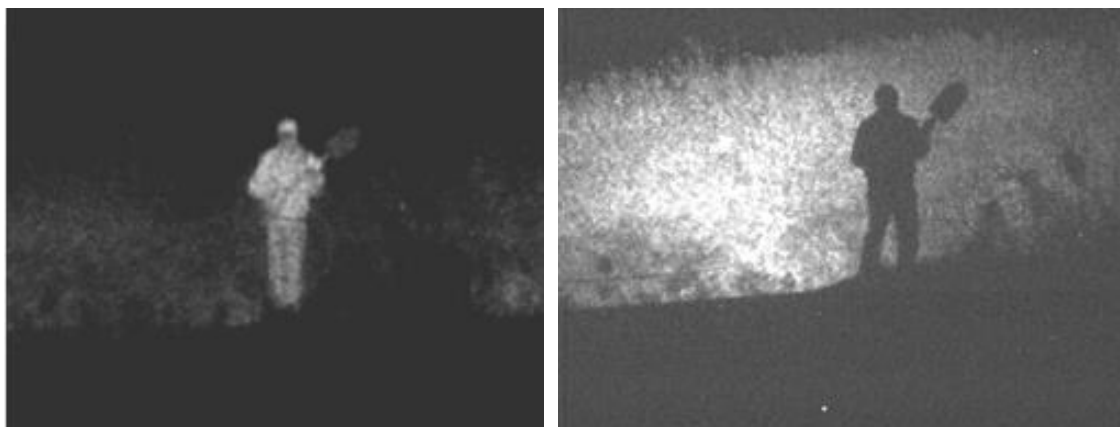
[Störning av målsökare](#)

2. Tillämpningar

2.1 Aktiv avbildning för hotidentifiering

Om en sensor, till exempel radar, signalspaning eller optikspaning, indikerar att det finns något intressant på en viss plats så är det ofta intressant att avbilda området med en högupplösande kameran sensor för att försöka identifiera vad som finns där. Högupplösta bilder kan även användas för att spana av områden där det baserat på hur terrängen ser ut skulle kunna gömma sig hot. Aktiv avbildning där en ”near infrared” (NIR) eller ”short wave infrared” (SWIR) laser belyser scenen och kameran detekterar den reflekterade strålningen ger mörkerförmåga. Fördelen med att använda bilder i NIR och SWIR är att bilderna är mer lika visuella bilder än vad termiska IR-bilder är och därmed lättare för en människa att tolka. Laserbelysning i det synliga området undviks oftast på grund av att den är så lätt att upptäcka.

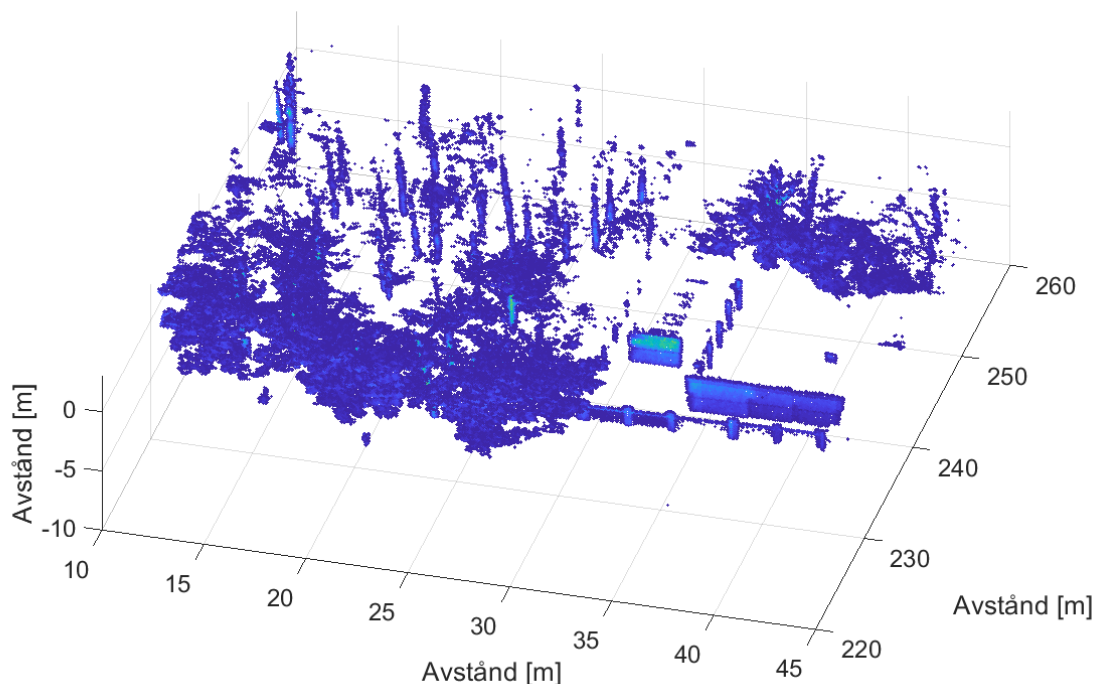
En pulsad laser och en kamera med extremt kort slutartid gör att endast laserstrålning reflekterad inom ett visst avståndintervall bidrar till bilden. Detta kallas grindad avbildning, och är bra för att separera ett mål från vegetation och andra objekt på annat avstånd, se Figur 1. Grindad avbildning är även bra för att reducera bakåtspridning från till exempel dimma eller rök, som annars försämrar kontrasten i bilderna.



Figur 1: Exempel på bilder tagna med grindad avbildning, där den vänstra visar målet isolerat och den högra bilden visar hur systemet kan användas för att avbilda silhuetten som ibland ger bättre identifiering.

Ännu bättre hotidentifiering kan uppnås med ett 3D-avbildande system, som mäter avstånd i varje pixel i bilden. För att upptäcka och identifiera fordon gömda i ett skogsbryn är det viktigt att ha förmågan att mäta flera avstånd i varje pixel och därmed kunna se genom små hål i vegetationen. Ett exempel på en mätning visas i Figur 2. Denna förmåga att se genom hål som är mindre än pixelns synfält ger en stor fördel med 3D-avbildning jämfört med 2D-avbildning. Även för mål i öppen terräng ger 3D-avbildning fördelar, med bättre förmåga att separera överlappande objekt och möjlighet att skilja på riktiga mål och skenmål. 3D-avbildning som mäter avstånd och amplitud för en reflekterad puls är mycket bra på att undertrycka bakåtspridning. Det finns också 3D-avbildningssystem som bygger på att använda flera 2D-bilder, dessa är mer känsliga för bakåtspridning och bakgrundsljus och kan bara mäta ett avstånd i varje pixel.

Aktiv avbildning är känsligt för upplösningstförluster. Effekten blir viktigare ju längre avståndet är, dels för att bättre vinkelupplösning krävs för att se saker av samma storlek på målet, och dels för att turbulens och spridning får en längre sträcka i atmosfären vilket ger en försämrad upplösning. Dämpning leder till lägre mottagen signal, och därmed lägre kontrast i 2D-bilder eller sämlre räckvidd för 3D-avbildning.



Figur 2: Exempel på 3D-avbildning av ett skogsbryn med små byggnader. Avståndsupplösningen och möjligheten att vrida på scenen och se data ur andra perspektiv ger stora möjligheter att se in i skogsbryn. Signalbehandling kan användas för att dölja ointressant information som lövverk.

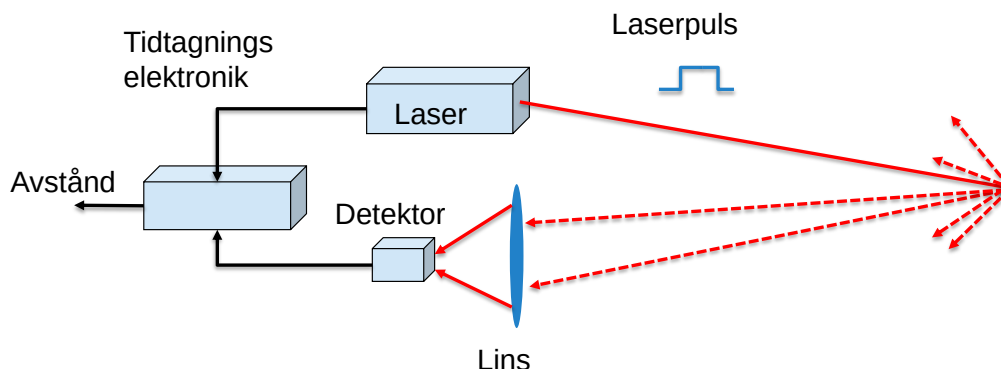
För att avbilda ett hotobjekt så behöver man belysa hela objektet. Är det utrustat med laservarnare så kommer mätningen därmed upptäckas. Än så länge är laservarnare dock inte så vanliga på markfordon, även om det främst är ekonomiska skäl som hindrar en installation. Påverkan på röjningsrisken handlar därmed främst om en kamera placerad på en annan plats kan upptäcka lasern som används för avbildning. Här kan hög dämpning vara en fördel genom att minska avståndet från vilket laserstrålens reflex på målet, eller spridningen från optiken där lasern skickas ut, kan upptäckas. Med hög spridning är det tänkbart att strålens väg genom luften kan synas i en kamera nattetid.

Aktiv avbildning över långa avstånd nära marken påverkas av hur brytningsindex varierar med höjden över markytan. Under vissa väderförhållanden kan en hågring bildas, så att en spegelvänd bild syns under eller över den verkliga riktningen till målet. I förhållanden när luften är kallast närmast marken kan detta leda till att man ser bortom horisonten. När luften är varmast nära markytan är risken istället att ett område inte går att se, utan att man istället ser himlen ovanför.

Tillbaka till Bakgrundsstrålning, Divergens, Hågring/ledskikt, Inledning, Kontrast- och upplösningsförlust, Laservapen och Upplösning.

2.2 Avståndsmätning

Det finns ett antal olika metoder att optiskt mäta avståndet till ett mål. Den militärt vanligaste är att sända laserpulser mot målet och mäta tiden tills den reflekterade strålningen kommer tillbaka, se Figur 3. Eftersom ljushastigheten är konstant och känd så kan tid direkt översättas till avstånd, där varje mikrosekund motsvarar 150 m i målavstånd. Avståndsmätarsystem kan antingen använda en laserpuls med hög pulsenergi eller många laserpulser med lägre pulsenergi, där signalbehandling av alla pulserna tillsammans gör att den reflekterade signalen kan urskiljas i bruset. System som använder många pulser kan generellt sett göras mindre i volym och vikt för samma prestanda, men har nackdelen att mätningen tar några hundra millisekunder.



Figur 3: Principen för en laseravståndsmätare. En laserpuls skickas mot målet, där ljuset sprids i alla riktningar. En liten del samlas in av mottagaroptiken och mäts av detektorn. Genom att mäta tiden från att laserpulsen skickas iväg till signalen registreras i detektorn så kan avståndet räknas ut.

För att avståndet ska kunna mätas måste tillräckligt mycket reflekterad lasereffekt nå mottagaren. Dämpning i atmosfären gör att maximal räckvidd minskar. Scintillation och andra effekter av turbulens kan göra att mottagen signal varierar vid olika mätningar, även om de görs direkt efter varandra. För ett system som använder enstaka laserpulser kan det därför vara lönt att försöka igen om laseravståndsmätaren inte ger något resultat, speciellt om mätningen görs över långa avstånd nära markytan.

Ur en telekrigssynpunkt är den viktiga frågeställningen med laseravståndsmätare om användningen kan upptäckas. Lyser man rakt på en laservarnarsensor så kommer laserpulserna registreras. Om laseravståndsmätaren riktar mot en annan punkt på plattformen så gör spridning i atmosfären att laserpulserna ändå kan upptäckas. Hur långt ifrån sensorn som lasern behöver riktas för att inte upptäckas beror på aerosolinnehållet i atmosfären. Upptäcktsrisken med bildalstrande sensorer beror kraftigt på våglängden, främst för att kameror har begränsat känslighetsområde. Bildförstärkare som är en vanlig sensor med hög känslighet ger stor möjlighet att upptäcka avståndsmätarlasrar i nära infrarött, medan kameror som är känsliga för laserstrålning vid 1,55 μm inte är lika vanliga.

Tillbaka till Aerosoler, Inledning, Laservarnare, Lidar för beslutsstöd och Pulslängd.

2.3 Fri optisk kommunikation

Fri optisk kommunikation, eller laserkommunikation, har fördelar som hög kapacitet och låg sannolikhet för upptäckt eftersom smala lober används. Den kan också vara svårare att störa ut än vad radiokommunikation är. Tekniken finns idag kommersiellt tillgänglig för punkt-till-punkt kommunikation över kilometeravstånd. Vanligtvis monteras sändar/mottagarenheter på byggnader eller i olika typer av master (Figur 4). Med hög kapacitet avses datahastigheter på Gigabit/sekund eller högre. Vid användning av laserkommunikationslänkar ställs relativt höga krav på peknoggrannhet och inriktning. Detta är särskilt viktigt om enheterna placeras på rörliga plattformar, något som är av militärt intresse. Telekrigsaspekten av laserkommunikation är möjligheter till upptäckt och avlyssning samt även möjligheter att störa kommunikationen.



Figur 4: Exempel på mastmonterade kommersiella laserlänkar.

Upptäckt av en laserkommunikationslänk kan ske genom detektion av strålning som sprids i atmosfären. Beroende på hur kraftig spridning är och vilka lasereffekter som används varierar sannolikheten för att man ska kunna upptäcka en strållob från sidan. Eftersom det är ett spridningsfenomen har våglängden och vilken typ av aerosoler som finns i atmosfären betydelse. Den våglängd som vanligtvis används vid laserkommunikation är 1,5 μm . En annan effekt som kan användas för att upptäcka sändar-/mottagarenheter som används för laserkommunikation är spridning i aperturen där laserstrålen lämnar systemet så kallad "port scatter". Utformningen av optiken och aperturen i sändarsystemet bestämmer här hur bra spridningseffekter kan undertryckas.

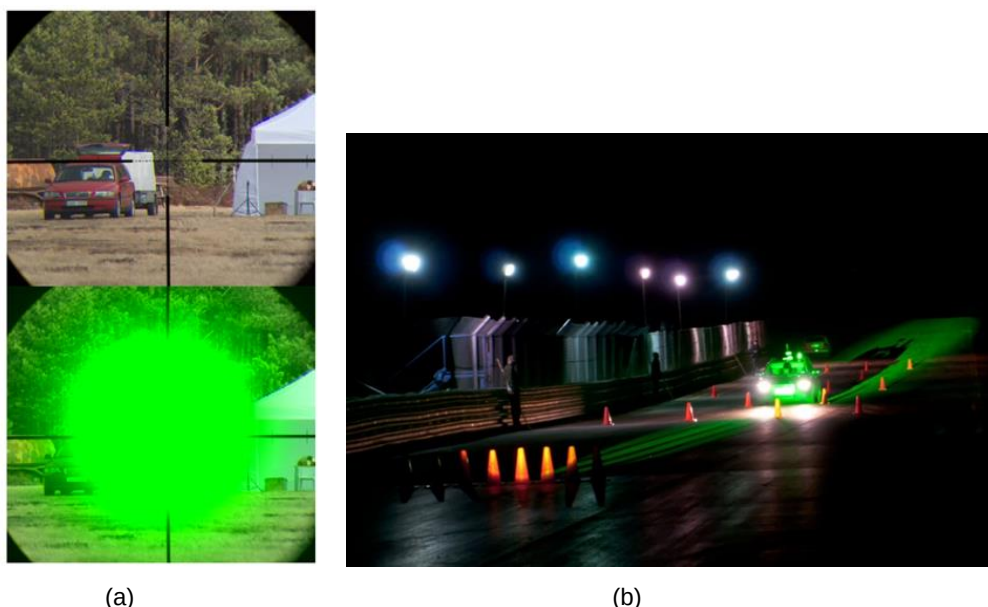
Turbulenseffekter, och då främst scintillationer, har stor påverkan på bitfelssannolikheten. Även dämpning kan givetvis innebära ett problem. För att medvetet störa en laserkommunikationslänk kan man antingen kraftigt öka dämpningen, genom till exempel rök, eller blända mottagardetektorn. För effektiv bländning krävs dock att störkällan är inom eller nära detektorns synfält, vilket gör bländning relativt svårt.

Tillbaka till Inledning.

2.4 Laserbländning

En laser kan användas för att blända olika typer av elektro-optiska (EO) sensorer och operatörer som använder sig av optiska hjälpmedel. Eftersom laserstrålen har en smal lob behövs noggrann invisning om bländningen ska ske över längre avstånd. Här kan invisning ske med en optikspanarsensor eller en högupplösande kamera. För kortare avstånd kan en bredare lob användas och kraven på invisning blir lägre. Typer av EO sensorer som bländas kan t.ex. inkludera sensorer som används för spaning och övervakning, sensorer som ger bättre mörkerförmåga som bildförstärkare och sensorer som används för olika typer av vapenstyrning. Laserkällan som används måste ha en våglängd som är anpassad till EO-sensors våglängdsområde vilket beroende på tillämpning kan inkludera laserstrålning från det synliga till det infraröda våglängdsområdet.

Effekterna av laserbländning varierar och beror på parametrar som EO-sensors elektriska uppbyggnad, optikkonstruktion där ströljus kan förstärka bländningen samt laseregenskaper. Om sensors detektor mätas av laserstrålningen skalar det störda området i en bild mot irradiansen (effekt per m²) framför sensoraperturen och vid tillräckligt hög irradians störs hela bilden. Temporala bländningseffekter kan skapas med en pulsad laserkälla där pulsrepetitionsfrekvensen kan varieras. Laserbländning orsakar kontrast- och upplösningssförlust i bildalstrande sensorer och kan vid högre effektnivåer skada detektorelement. Även mänskliga ögon kan skadas vid stark laserbelysning. I protokoll IV till konventionen om förbud mot eller inskränkningar i användningen av vissa konventionella vapen stadgas att det är förbjudet att använda laservapen som är särskilt konstruerade för att bestående förstöra en normal synförmåga. Detta tolkas oftast som att ett lasersystem avsett för bländning inte får utsätta någon för högre laserintensitet än gränsvärdet för maximalt tillåten exponering (MTE), som för kontinuerliga lasrar i det synliga våglängdsområdet är 10 W/m².



Figur 5: (a) Exempel på laserbländning med grön laser (532 nm våglängd). Simulerad effekt av laserbländning av en operatör med ett kikarsikte där ett vapen riktas mot scenen med bil. (b) Exempel på laserbländning vid försök där bilförare utsätts för laserexponering under kontrollerade experimentella betingelser.

Laserbländning kan också användas både mot operatörer som nyttjar optiska hjälpmedel och mot det oskyddade ögat, där det senare fallet t.ex. kan involvera tillämpningar där icke-dödliga vapen krävs. I Figur 5 (a) visas ett exempel på simulerade effekter av laserbländning av en prickskytt som siktar med ett kikarsikte. Här används en kontinuerlig laser där effekten blir döljande bländning där information i scenen går förlorad. När lasereffekten höjs ökar här det störda området. Genom att pulsa belysningen skapas en obehaglig situation för operatören vilket oftast resulterar i att optiken (öga) vänds från laserkällan eller att personen blundar. Ett annat exempel på laserbländning av det bara ögat visas i Figur 5 (b) där en fordonsförare blir laserbelyst och motivet är att få stopp på fordonet. En tillämpning här är t.ex. vid en vaktpost där ett fordon närmar sig utan att stanna på givna signaler.

Vid laserbländning måste effekter från atmosfären beaktas där dämpning på grund av spridning och turbulens kan reducera effektiviteten av bländningen. Generellt sett är atmosfären dock inte ett stort problem i bländningstillämpningar då sensorn som ska bländas också påverkas av samma atmosfärsförhållanden och därmed förlorar sin effektivitet samtidigt som bländningen försvåras.

Tillbaka till Fri optisk kommunikation, Inledning, Optikspaning, Pulslängd.

2.5 Laserutpekning

En laser kan användas för att peka ut ett mål för ett styrt vapen. Här riktas laserfläcken på målet och vapnet styr mot den reflekterade laserstrålningen. En viktig del av ett system baserat på laserutpekning är målföljning, särskilt om plattformen och målet rör på sig. Laserstrålen linjeras längs systemets siktlinje för målföljning. Vanligtvis används en kamerasensor för följning med en lämplig målföljare. Laserutpekningssystemet har normalt en pulsad laser där pulsrepetitionsfrekvensen är relativt låg (storleksordning tiotals Hertz). Våglängden är omkring 1 mikrometer, dvs. inte synlig för ögat och lasersäkerhetsavstånden är långa. Ett laserutpekningssystem har smala lober (låg divergens) för att hög laserintensitet ska fås på det markerade målet.

De två huvudsakliga atmosfärsfaktorer som påverkar prestanda hos ett laserutpekningssystem är transmission genom atmosfären och turbulens. I de två exemplen nedan kommer vi att diskutera hur dessa faktorer kan ha inverkan på laserutpekningens förmåga. Det första målutpekningssystemet är LDP:n ("Laser Designator Pod") som används av Gripen-systemet för att fälla bomber som GBU-12/49 (Figur 6). I LDP:n sitter en kamerasensor som används för målinsyn och följning. Vanligtvis fälls bombarna från relativt hög höjd där en sned utpekningsskiva används. Turbulenseffekter kan orsaka strålvandring, där laserfläcken rör sig över målet, samt irradiansfluktuationer (scintillationer) där strålskivan har en varierande intensitet. Transmissionen av laserstrålning längs utbredningsriktningen kan påverka irradiansen (effekt per m²) på målet och därmed den reflekterade strålningen som detekteras av den smarta bomben. Spridning från dis och rök har liten effekt på laserutpekning, då målsökarna följer den puls som når detektorn sist och då har reflekterats på längst avstånd vilket oftast är målet. Minst lika viktiga som effekterna på laserstrålen är försämringar i bildkvaliteten, som gör att det inte går att följa målet och placera laserstrålen på rätt punkt.



Figur 6: Målutpekningssystem, LDP ("Laser Designator Pod") som används av Gripen-systemet för att fälla bomber som GBU-12 och GBU-49 som är laserstyrda. Bild: [Försvarmakten]

Ett annat exempel på ett system som utnyttjar målutpekning är Robot 17 som bl.a. används av Amfibieregementet i en skärgårdsmiljö (Figur 7). Här skiljer sig siktlinjen väsentligt från LDP-systemet där en sned siktlinje mot marken används. För Robot 17 kan siktlinjen beskrivas som horisontell och befinna sig ganska nära vattenytan. I en skärgårdsmiljö skiljer sig också både transmissionsegenskaper i atmosfären och turbulensförhållanden jämfört med för Gripen-systemet. Transmissionen ges av absorption av olika molekyler samt spridning pga. aerosoler. I skärgårdsmiljön kan aerosolfördelningen skilja sig jämfört med flygfallet. Turbulensen nära vattenytan är också ofta starkare jämfört med banan från luft till mark där luftfuktighet, skillnad i vatten och lufttemperatur, lufttryck samt vindhastighet påverkar turbulensstyrkan.



Figur 7: Robot 17 som används av Amfibieregementet mot marina mål i skärgårdsmiljö. Bild: [Försvarmakten]

Tillbaka till Bakgrundsstrålning, Divergens, Inledning, Laserkorona, Laservarnare och Pulslängd.

2.6 Laservapen

Under den senaste tiden har det skett en snabb utveckling av lasrar som kan generera höga medeleffekter, vilket ökat intresset för laservapen. Delvis är det tillverkningsindustrin som bidragit till framstegen där fiberlasrar med höga effekter använd för materialbearbetning. Genom att kombinera flera fiberlasrar har man lyckats visa möjligheter med ett elektriskt pumpat laservapen. Flera teknikdemonstratorer har visats i USA och Europa (Figur 8 (a) och (b)) mot bl.a. mindre obemannade flygande farkoster ("Unmanned Aerial Vehicles", UAV:er), lättare snabbgående båtar samt vapenhot som granater och raketer ("Rockets, artillery and mortars", RAM). Huvudsakligen har en relativt enkel teknik nyttjats där flera laserstrålar fokuseras individuellt på målet och verkansräckvidder på ca 2–3 kilometer beroende på måltyp kan uppnås.



(a)

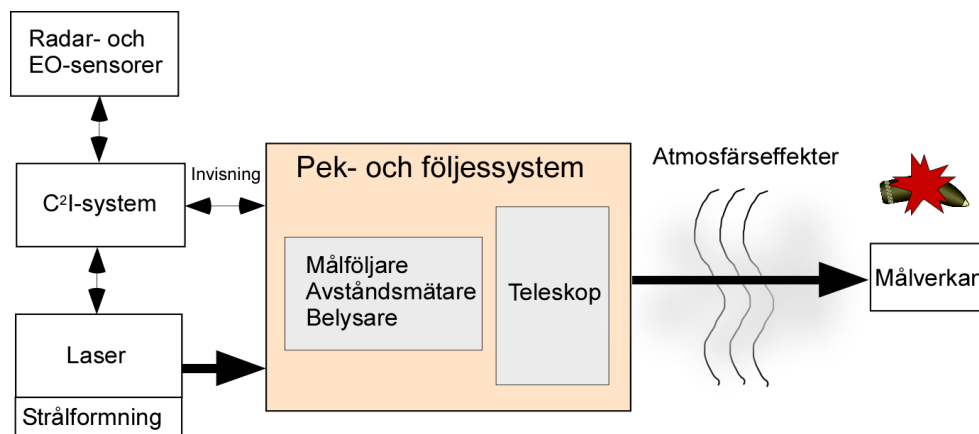


(b)

Figur 8: A) LaWS ("Laser Weapon System") som studeras av amerikanska flottan för marina tillämpningar. (Källa: US Navy). B) Taktiskt laservapenkoncept som demonstrerats av Rheinmetall vid fältförsök för verkan mot UAV:er och RAM-mål Bild: [Rheinmetall]¹

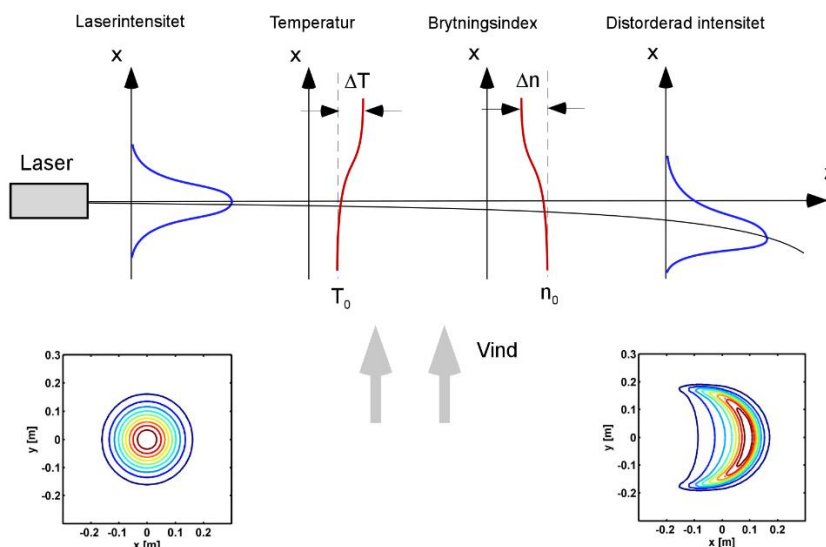
Ett laservapensystem behöver förutom en laserkälla som kan skapa mycket höga medeleffekter några övriga delsystem och komponenter enligt Figur 9. En grovinvisning av systemets siktlinje sker efter målupptäckt vanligtvis med högupplösande radar- eller avbildande EO-sensorer. Laservapnet är vanligtvis monterat på ett stativ som har ett pek- och följesystem. Följning kan ske både genom aktiv (laserbelysning) och passiv avbildning, eller en kombination av båda. Ett sätt att öka medeleffekten för ett laservapen är att kombinera flera laserkällor inkoherent eller koherent. Hittills har teknikdemonstratorer som presenterats i den öppna litteraturen nyttjat inkoherent strålkombinering där strålarna från de individuella laserkällorna fokuseras på målet genom strålkontroll med t.ex. speglar. Återkoppling kan här fås genom de avbildande systemen som ger information om var på målet strålarna befinner sig. Framtida system kan innehålla koherent strålkontroll vilket innebär att fasen hos individuella laserkällor kan kontrolleras och återkoppling av målsignalen kan användas för att optimera fasen så att laserstrålningen koncentreras till en så liten punkt på målet som möjligt.

Olika typer av system som använder aktiv- och adaptiv optik kan användas för att optimera lasereffekten på målet och kompensera för prestandabegränsningar som uppstår på grund av atmosfären.²



Figur 9: Schematisk beskrivning av delsystem som ingår i ett laservapen.

De allvarligaste prestandabegränsningarna för ett laservapen är atmosfärsrelaterade. Dagens teknikdemonstratorer använder sig av en våglängd kring $1\ \mu\text{m}$ vilket medför att spridningseffekter och turbulens kommer att påverka prestanda. Väderberoendet har varit en av invändningarna mot taktiskt användning av laservapen. Vid kortare verkansavstånd upp till några kilometer blir atmosfärens inverkan inte lika kritisk. Turbulenseffekter i form av strålvandring och intensitetsfluktuationer (scintillationer) kommer att påverka möjligheter att fokusera och rikta laserstrålen på målets träffpunkt. Här påverkas även information i bildalstrande sensorer genom vinkelfluktuationer vilket medför att målsignalen kan "dansa runt" i kamerabilden. Intensitetsfluktuationer gör det även svårt att använda den återkopplade signalen när kameror eller sensorer för att känna av fasinformation används. Spridningseffekterna i atmosfären på grund av olika aerosoler påverkar den totala transmissionen och därmed medeleffekten av laserstrålning som når målet. Vid användning av ett laservapen kan effekttätheten vara så hög att luften i atmosfären värms upp på grund av att laserstrålning absorberas, vilket medför att luftens brytningsindex förändras ("thermal blooming"), se Figur 10 för en illustration av fenomenet. Effekten orsakar att laserstrålen böjs av och distorderas vilket medför att effekttätheten minskar på målet.



Figur 10: Illustration av hur uppvärmning av luften i atmosfären distorderar en laserstråle på grund av förändringar av brytningsindex. I exemplet "kyls" atmosfären av vind från en viss riktning.

Tillbaka till Dis, Divergens, Inledning, Pulslängd.

2.7 Laservarnare

Laservarnare är sensorer som sätts på plattformar för att upptäcka om plattformen blir belyst av lasersystem. Varje sensorenhet består oftast av flera olika sensorer med olika uppgifter, se Figur 11. Några sensorelement ska upptäcka belysning med kraftiga pulser, från till exempel [laseravståndsmätare](#) eller [laserbelysare](#), och även mäta in riktningen lasern kommer ifrån. Andra detektorer är optimerade för att upptäcka svagare laserpulser från till exempel [ledstrålesystem](#). Olika detektorer används beroende på [våglängd](#) och [pulslängd](#) på laserhoten.



Figur 11: Två exempel på sensorenheter för laservarnare, till vänster Saab Avitronics, LWS 310 för fordon, flyg och fartyg, till höger Elbit, E-laws för fordon och fartyg.

Om hotlasern riktas rakt mot sensorn så kommer en mycket stark signal att mätas. Detta är dock en ovanlig situation då laservarnarsensorerna är små och det oftast bara sitter några få på en plattform. Det som gör att laservarning ändå fungerar är [spridningen](#) i atmosfären. Spridningen skapar en [laserkorona](#) runt en laserstråle, som inte skulle finnas i vakuum, som kan mätas utanför den egentliga laserstrålen. Hur stark koronan är och hur långt utanför centrum på laserstrålen den sträcker sig beror på mängden [aerosoler](#) i luften. Oftast finns det mycket aerosoler i luften över havet, det är därför det är möjligt att använda ganska få laservarnarsensorer på ett fartyg.

Eftersom laservarnare främst mäter spridd laserstrålning så kommer andra atmosfärs effekter, som till exempel effekten av [turbulens](#), inte spela så stor roll för möjligheterna att upptäcka laserbelysning. Men beroende på hotsystem kan turbulensen ha en viss påverkan på detektion och prestanda. [Dämpning](#) kommer givetvis att minska signalen, och därmed möjligheten att upptäcka laserbelysning. I de flesta fall så kommer dämpningen dock att sänka prestanda för hotsystemet lika mycket eller mer.

Tillbaka till [Aktiv avbildning för hotidentifiering](#), [Avståndsmätning](#) [Inledning](#) och [Laserkorona](#).

2.8 Ledstrålesystem

En typ av vapenstyrning är att utnyttja en laser som riktas mot målet av en operatör. En avfyrad robot kan sedan följa ledstrålen genom att detektorer som monterats på robotens bakdel känner av var i ledstrålen den befinner sig. Ett exempel på ett svenskt ledstrålesystem är Robot 70 (Figur 12). Ett exempel på ett ryskt system är Kornet, som finns i många olika utföranden för luft- och marktillämpningar, se exempel i Figur 13. Ledstrålesystem finns i olika varianter men luftvärnstillämpningar är vanligast. Principen för ett ledstrålesystem är relativt enkel. Man kan i princip dela in förloppet i två faser; i den första fasen är laserstrålen relativt bred och detektorer som sitter monterade på robotens bakdel känner av var roboten befinner sig och styr mot siktlinjen. Därefter ändras laserstrålen och divergensen på laserstrålen minskar genom en zoomoptik så att räckvidden ökar för en given lasereffekt. I avancerade system kan ledstrålen skannas för att definiera siktlinjen, och robotens läge relativt målet bestäms genom tid- och lägeskodning. Typisk laserkaraktistik för ett ledstrålesystem är en laservåglängd i det närlinfraröda våglängdsområdet och pulssad laseremission med en pulsrepetitionsfrekvens i kilohertzområdet. Lasereffekt hålls så låg som möjligt för att laservarnare inte ska kunna upptäcka ledstrålen.



Figur 12: Robot 70 monterad på en pansarterrängvagn under övning. Bild: [Försvarsmakten]

Ett ledstrålesystem påverkas både av transmissionen genom atmosfären och av turbulensförhållanden, som båda kan minska lasereffekten som når roboten. Bildkvaliteten i operatörens sikte kan försämrats i dåligt väder med låg atmosfärstransmission på grund av kontrastförluster och i soligt väder på grund av upplösningförluster från turbulens. I luftvärnstillämpningar riktas synfält och laserstråle snett uppåt, och eftersom turbulensnivån oftast avtar med höjden över marken så blir effekterna då mindre än för system i mark-till-marktillämpningar. Ett problem som kan behöva lösas med ett ledstrålesystem är att robotmotorn både kan skapa turbulenseffekter och partiklar som kan dämpa strålningen från lasern som tas emot i detektorn på roboten.



Figur 13: Bild av det ryska ledstrålesystemet Kornet. Bild: [Creative Commons]³

Tillbaka till Divergens, Inledning och Laservarnare.

2.9 Lidar för beslutstöd

En uppgraderad avståndsmätare kan mäta bakåtspridningen från atmosfären längs mätsträckan. Med hjälp av signalbehandling går det sedan att baserat på hur signalen avtar med avståndet beräkna hur stor dämpningen längs sträckan är just nu på precis den här platsen. Oftast krävs medelvärdesbildning av ett stort antal laserpulser för att få tillräcklig signal. När dämpningen är känd så går det att beräkna räckvidden för både motståndarens och egna målsökare och spaningssensorer. Med lidardata som underlag för ett beslutsstödsystem är det därför möjligt att få en bättre bild av riskerna med att vid just det här tillfället befinna sig på en viss position jämfört med tänkbara fientliga positioner.

Tillbaka till Aerosoler och Inledning.

2.10 Optikspaning

Ett effektivt sätt att spana efter, upptäcka och lokalisera hot som använder optiska sikten eller elektro-optiska sensorer för spaning eller vapenstyrning är att använda en optikspanarsensor. Principen för optikspaning är att de flesta optiska system skapar en retroreflex när de blir belysta med en laser. Retroreflexen är strålning som reflekteras från optiken (vanligtvis från någon komponent som är placerad i ett fokus) i samma riktning som den infallande strålningen. Ett krav här är att lasern våglängd ska ligga inom optikens transmissionsområde. Olika typer av optikspanarsensorer kan konstrueras. I en flodbelysande sensor (där hela eller delar av scenen belyses på en gång) används en ljuskänslig kamera som synkroniseras med laserpulser där synfältet vanligtvis är några grader. Flodbelysande konfigurationer används vanligtvis av soldater som handburna eller monterade på någon form av enklare stativ. I ett skannande system används ett mindre momentant synfält (som är laserbelyst) för att skanna av ett större område, se Figur 14. Det skannande systemet har fördelen att längre räckvidder kan fås eftersom högre laserintensitet på målet används.

Flodbelysning

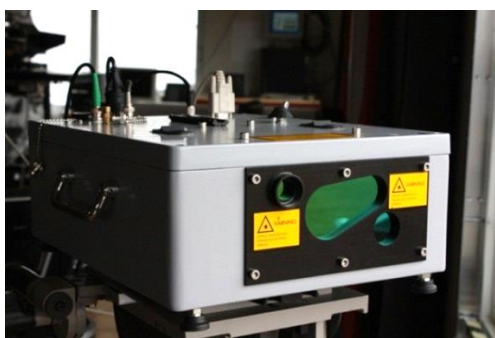


Skannande spalt



Figur 14: Den övre bilden visar hur en flodbelysande sensor belyser en del (gult) av sensorns totala synfält. Den undre bilden visar hur en skannande spalt (gult) med ett mindre momentant synfält än sensorns totala synfält.

I Figur 15 ges två exempel på olika optikspanarsensorer. Ett flodbelysande system används för att utvärdera tekniken i olika situationer och tillämpningar (Figur 15(a)). En annan typ av sensor, baserad på ett snabbt roterande spaltformat synfält, har implementerats på ett stridsfordon (Figur 15(b)). Sensorn sitter på ett chefsikte och spanar kontinuerligt runt horisonten för att upptäcka optiska hot. Integrerat med spaningssensorn finns även ett optiskt bländsystem som snabbt kan verka mot upptäckta och lokaliserade hotsensorer.



(a)



(b)

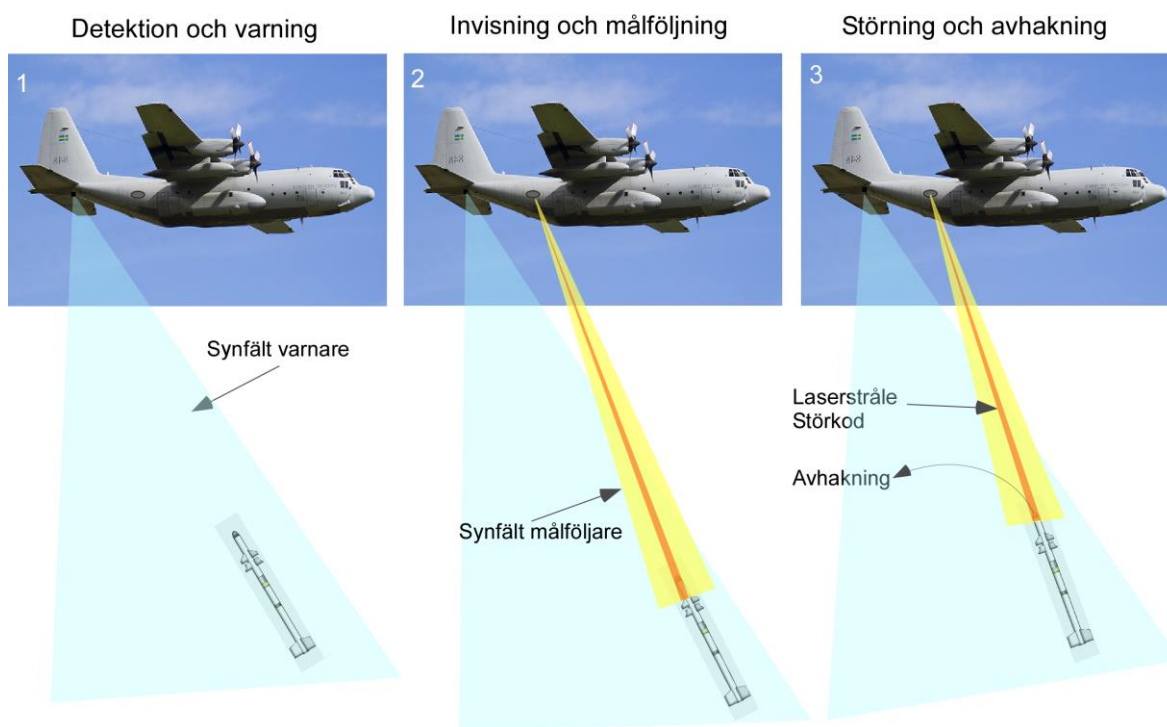
Figur 15: (a) Flodbelysande optikspanarsensor som används för att utvärdera tekniken. (b) Skannande optikspanarsensor som implementerats som teknikdemonstrator på stridsfordon 90. Sensorn sitter monterad på chefsiktet LEMUR (se pilen) och avsöker horisonten för att detektera optiska hot.

Vanligtvis utnyttjar en optikspaningssensor en våglängd i det nära infraröda våglängdsområdet för att inte vara synligt för ögat. För funktionen krävs dels att den utsända laserstrålningen träffar aperturen på hotsystemet, och dels att tillräckligt mycket reflekterad strålning tas emot av systemets mottagare, vilket medför att systemet kan påverkas av atmosfäreffekter som spredning och turbulens i atmosfären. Spridningseffekter kan minska den tillgängliga lasereffekten på ett mål och följaktligen reducera systemets räckvidd. Eftersom en utbredningsträcka längs marken vanligtvis används kan turbulenseffekter vara besvärliga vid optikspaning, särskilt om objekt med låg optisk signatur ska detekteras. Turbulenseffekter påverkar både räckvidd och förekomst av falsklarm. Fluktuationer i den registrerade signalen som uppkommer på grund av turbulensfenomen kan orsaka att mål med lågt signal-till-brusförhållande inte detekteras, vilket ökar risken att mål som ligger på räckviddsgränsen missas. Scintillationer kan också göra att signalen som reflekteras från diffusa ytor blir oväntat stark vid enskilda tillfällen, något som kan ge upphov till ett falsklarm. Optikspaning vid längre våglängder reducerar prestandabegränsningar på grund av turbulens.

Tillbaka till Aktiv avbildning för hotidentifiering och Inledning.

2.11 Störning av målsökare

Det är möjligt att introducera falska mål i en retikelmålsökare (där en roterande skiva i fokus för målsökarens lins kodar riktningen till målet på en signal) genom att belysa den med en pulsad laser vid en våglängd som ligger inom målsökarens känslighetsområde. Mönstret av pulser som skickas behöver vara anpassat till målsökarens funktion för att lura den att svänga av från det riktiga målet och följa det falska målet till det riktiga målet kommit ur målsökarens synfält. Den vanligaste användningen av detta, som är operativ i flera länder, är att skydda flygplan mot robotar med IR-retikelmålsökare. Systemen brukar kallas DIRCM-system för "directed infrared countermeasures", eller riktade IR-motmedel, där systemets princip kan ses i Figur 16. Det främsta hotet man försöker skydda sig emot är så kallade MANPADS, "man-portable air defence systems", som finns spridda i stora delar av världen. Det är tänkbart att störa även andra målsökare med laser, till exempel på sjömålsrobotar.



Figur 16: Tidsekvens av DIRCM-system. (1) En missil upptäcks genom att den befinner sig i varnarens synfält. (2) DIRCM-systemet riktar in mot missilen och den fångas in av en målföljarkamera. (3) DIRCM-systemets laser skickar en störcode som avleder missilen (avhakning) från det riktiga målet (flygplanet).

Dämpning är generellt inget stort problem vid störning av målsökare, eftersom plattformens signatur dämpas lika mycket som störlasern och stör-till-signalkvoten därmed är konstant. Turbulenseffekter som strålvidgning sänker däremot effekten inom målsökarens apertur mer för en smal laserstråle än för värmestrålningen som redan går i alla riktningar. Eftersom flygplanet befinner sig uppe i luften så är dock turbulensen lägre än vid markytan, och därmed är effekten inte så kraftig. Strålavböjning kan vara ett allvarligt problem som gör att lasern helt missar målsökaren. Problemet beror på att sensorn som visar in ett DIRCM-system och lasern inte sitter på samma plats. Eftersom brytningsindex i luften påverkas av luftflöden runt ett flygplan och av varma motoravgaser kan de två optiska systemen påverkas på olika sätt och därför stämmer inte inriktningen. Oftast används en målföljarkamera tillsammans med lasern för att minska effekten av detta.

Tillbaka till Inledning, Pulslängd.

3. Prestandapåverkande effekter

3.1 Dämpning och transmission

I det ideala fallet då ljus utbreder sig i vakuum förekommer ingen dämpning. I atmosfären däremot förekommer molekyler och partiklar som står i vägen för utbredningen. Laserstrålningen växelverkar med materien i atmosfären vilket resulterar i att laserstrålningen dämpas med sträckan den utbreder sig i atmosfären. Beroende på atmosfärens innehåll dämpas laserstrålningen mycket eller lite per avståndsenhet.

Orsaker till dämpning är absorption och spridning. Det finns flera atmosfärsfenomen som påverkar dämpningen, till exempel moln, dimma och aerosoler. Dämpningen varierar med våglängden, där förhållandet mellan olika våglängder beror på orsakerna till dämpningen.

Dämpningen kan teoretiskt beskrivas av en ekvation kallad Beers lag. En laserstråle skickas ut med effekten P_0 i atmosfären och efter en sträcka R har strålens effekt dämpats till P på följande sätt:

$$P = P_0 e^{-\sigma R},$$

där σ är extinktionskoefficienten som beskriver hur mycket atmosfären absorberat och spridit strålen. Dämpningen är exponentiell, se förklaring i Appendix A.2. Förhållandet mellan den utsända strålens effekt P_0 och den uppmätta effekten P anger transmissionen, τ , enligt ekvationen:

$$\tau = \frac{P}{P_0}$$

I vakuum, där ingen absorption eller spridning av strålen sker, är transmissionen 1. Dämpning följer logaritmlagarna och har egenskapen att om transmissionen för sträckan L är 0,5, så är transmissionen för sträckan $2L$ kvadraten av detta $0,5^2 = 0,25$.

Det visuella siktavståndet kan beräknas genom att relatera extinktionskoefficienten till en kontrasttröskel, C_T , på 2% för våglängden $0,55 \mu\text{m}$ (som ligger mitt i ögats känslighet) enligt ekvationen:

$$V = \frac{-\ln(C_T)}{\sigma} = \frac{3,912}{\sigma},$$

där V är det visuella siktavståndet i km.

Tillbaka till Aerosoler, Aktiv avbildning för hotidentifiering, Avståndsmätning, Dis, Fri optisk kommunikation, Laserbländning, Laserutpekning, Laservarnare, Ledstrålesystem, Lidar för beslutsstöd, Luftfuktighet, Nederbörd, Räckviddsförlust och Störning av målsökare.

3.2 Hägring/ledskikt

En hägring uppstår vid en onormal fördelning av temperaturen med höjden i den lägre delen av atmosfären. Därmed följer också en onormal vertikal täthetsfördelning hos luften, vilket är grundorsaken till det brytnings- eller refraktionsfenomen som hägringen utgör.

(SMHI:s kunskapsbank, 2019)⁴

Hägringar förekommer oftast över homogena ytor där temperaturskiktningen är likartad över längre sträckor. Det förhållandet brukar uppstå över exempelvis öknen, havsytor, plana snöytor och asfalt.

Atmosfären nära markytan värms upp av solen och det skapas ett luftlager, även kallat luftskikt, med högre temperatur och lägre densitet. Det uppvärmda luftskiktet är tunnare och har ett lägre [brytningsindex än luften ovanför](#). Ljuset som emitteras eller reflekteras av den uppvärmda markytan kommer att brytas uppåt (ifrån normalen) i det uppvärmda luftskiktet och inte nå fram till en observatör som står på marken. Ljuset som kommer ifrån himlen, i det kallare luftskiktet kommer däremot att brytas (mot normalen) och nå fram till en observatör som står på marken. Detta kan då ge illusionen av att ytan med det uppvärmda luftskiktet är täckt med vatten (likt en vattenspegel) eftersom det bara är ljuset från himlen som når observatören på marken, se Figur 17.

Då det understa luftlagret, som är närmast marken, är varmare än luften ovanför kallas det att luften har en negativ temperaturgradient. Är denna temperaturgradient stor uppstår hägring. På natten kan fenomenet vara det omvända, se [dygnsvariationer](#). Luften närmast marken kan vara kallare och en positiv temperaturgradient uppstår, då är det till exempel möjligt att se bortom horisonten.⁵



Figur 17: Det optiska fenomenet hägring kan uppstå över uppvärmda plana ytor eller där temperaturskillnaden är stor. I bilden har det bildats ett uppvärmt luftlager ovanför havet som bryter ljuset bortom horisonten så att berget ser ut att sväva ovanför havet. Bilden är tagen vid Norges kust och fenomenet kallas ibland för Fata Morgana. Bild: [Creative Commons]⁶

Ljuset från olika lasertillämpningar, till exempel [avbildning för hotidentifiering](#), utbreder sig i dessa luftskikt, även kallade ledskikt. Resultatet kan bli att laserstrålningen helt eller delvis bryts bort och inte når det tänka målet eller observatören. Dessa ledskikt förändras ständigt i storlek och utbredning. Vid observation över plana ytor bör man vara vaksam på att hägringsfenomen kan förekomma och påverka strålutbredningen. Effekten är densamma i båda riktningar, om du inte kan se en person på andra sidan på grund av hägringsfenomen så kan den heller inte se dig.

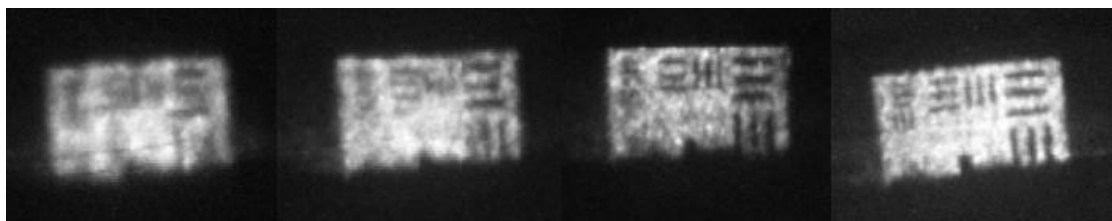
Tillbaka till [Aktiv avbildning för hotidentifiering](#), [Brytningsindex](#), [Refraktion](#), [Strålavbøjning](#) och [Vind](#).

3.3 Kontrast- och upplösningsförlust

När ett avbildande system används för att titta på objekt genom en turbulent atmosfär kommer atmosfärens egenskaper påverka bildkvaliteten. Som beskrivs i avsnittet om upplösning och kontrast i avbildande system så kan atmosfärspåverkan beskrivas med en modulationsöverföringsfunktion (MTF). Denna MTF, som beskriver hur avbildningen försämras på grund den turbulenta luften, kan multipliceras ihop med MTF för optiksystemet och bilda en total MTF.

Precis som med scintillationer och strålvandring för en laserstråle kommer atmosfärturbulensen påverka avbildande system i huvudsak på två sätt, genom att bilden kommer "dansa" slumpmässigt i sida, och genom att göra bilden av objektet suddigare. Förflyttningen av bilden uppkommer på grund av att stora "luftpaket" med variationer i brytningsindex rör sig i förhållande till kamera och objekt och på så sätt får ljusstrålarna från objektet att tillsammans böjas av relativt ursprungsriktning (jämför med strålvandring för en laserstråle). Något mindre "luftpaket" förflyttar ljuset i olika riktningar i olika delar av bilden, vilket ger en rak linje en vågform. Suddigheten uppkommer på grund av de små "luftpaketen" då olika ljusstrålar från objektet kommer att böjas lite olika och på så sätt vara sammanblandade när de träffar sensorn. Resultatet blir att bilden kommer att bli suddigare än i en icke-turbulent atmosfär (jämför med scintillation och strålvandring för en laserstråle). Man kan säga att de små "luftpaketen" fungerar som ett filter som dämpar fina strukturer i bilden, effekten blir till exempel att skarpa kanter avbildas suddiga, små distinkta punkter avbildas som suddiga utsträckta objekt, och att upplösningen minskar.

Ett exempel på hur marknära turbulens kan degradera upplösningen i ett avbildande system kan ses i Figur 18. Bilderna är tagna med ett aktivt avbildande system, i detta fall med så kallad grindad avbildning, där målet belyses med laserpulser och sensorn kan filtrera det reflekterade ljuset i tid för att undertrycka till exempel brus eller reflektioner från täckande objekt. Målet placerades ungefär 2 km från det avbildande systemet som i sin tur kunde variera sin position i höjddled. I Figur 18 ses tydligt en förbättring i upplösningen i takt med att det avbildande systemet lyfts upp över marken. Orsaken till detta är att turbulensen i luften var starkast i marknivå och avtog med höjden. I takt med att systemet höjdes gick större och större del av strålgången mellan system och mål genom områden med lägre turbulens, och som en konsekvens så degraderades bilderna mindre.



Figur 18: Upplösning i ett avbildande system som funktion av turbulens. Bilderna togs av ett aktivt avbildande system (grindad avbildning) och målet belystes med laser med våglängden 1,57 μm . Målet, en tavla för att undersöka upplösning, placerades ungefär 2 km från systemet. Systemets position i höjddled varierades, och bilderna (från vänster till höger) är tagna vid 5,15, 7,65, 10,35 och 13,15 m höjd. Bild: [O. Steinvall et al.]⁷

Tillbaka till Aktiv avbildning för hotidentifiering, Dis, Laserbländning och Ledstrålesystem.

3.4 Laserkorona – spritt ljus utanför strålen

Då en laserstråle utbreder sig genom atmosfären kommer delar av ljuset att spridas mot aerosoler. Spridningsvinkeln beror på skillnaden mellan aerosolens storlek och våglängden på ljuset och aerosolens brytningsindex. Effekten av aerosolspridningen hos en laserstråle kan liknas vid den ”korona” eller ljuskrans som kan ses runt solen eller en gatlampan i dimmiga eller regniga förhållanden. I Figur 19 visas en solkorona där man tydligt kan se att spridningsvinkeln på solljuset varierar med våglängden (det vill säga färgen). *Det är viktigt att notera att regnbågseffekten i Figur 19 i de flesta fall inte kan fås vid lasertillämpningar.* Detta då lasrar typiskt genererar ljus inom ett snävt våglängdsintervall. Vad som istället fås här är en krans eller disk runt strålen med sidospritt ljus.



Figur 19: Korona runt solen på grund av ljusspridning i dimma. Bild: [Creative Commons]⁸

I militära tillämpningar är laserkoronan en effekt som man måste ta hänsyn till. Det sidospridda ljuset från till exempel en laserutpekare kan detekteras med en laservarnare och på så sätt varna för belysning, och motsvarande, belyser man ett mål kan sidospritt ljus röja ens närvaro.

Tillbaka till Dimma och Laservarnare.

3.5 Räckviddsförlust

Lasersystem har en viss räckvidd för att kunna identifiera ett målobjekt. Räckvidden för systemet kommer att ändras beroende på förhållandet i atmosfären, till exempel dämpning, bakgrundsförhållanden och turbulens. Hur stor förlusten i räckvidd blir beror på kombinationen av flera faktorer.

Ett laserbaserat systems räckvidd bestäms av gränsen då den detekterade signalen inte kan särskiljas från bakgrundsbruset i detektorn. Det innebär att räckvidden styrs både av lasersignalens styrka och av nivån på bakgrundssignalen. Styrkan i den detekterade signalen påverkas av uteffekten på lasern, men även på prestandapåverkande effekter i atmosfären, till exempel scintillation, spridning och absorption. Till exempel spelar val av våglängd stor roll när ett lasersystem designas, typiskt försöker man undvika våglängder där atmosfärsgaserna har stark absorption, då räckvidden signifikant kan påverkas av detta.

Bakgrundsbruset i detektorn, å andra sidan, styrs till exempel av temperatur och solens bakgrundsstrålning. Till exempel kan ett laserbaserat system som begränsas av storleken på bakgrundsbruset i detektorn förväntas ha längre räckvidd nattetid, då bakgrunden är lägre än på dagen.

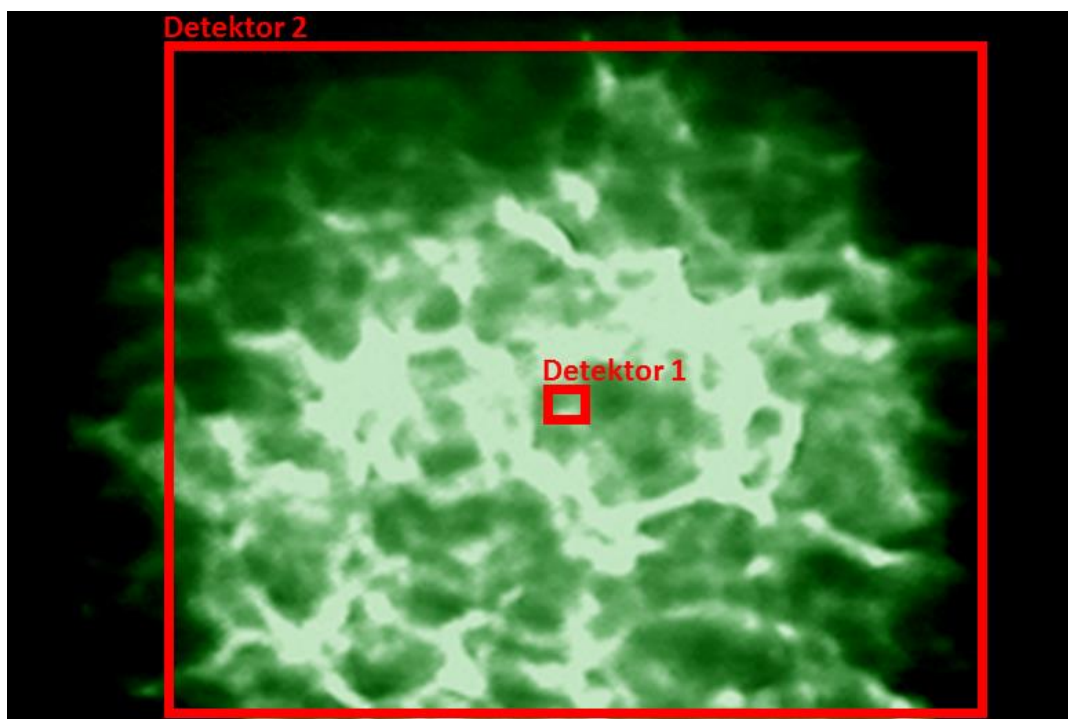
Tillbaka till Aerosoler, Aktiv avbildning för hotidentifiering, Bakgrundsstrålning, Dimma och Dis.

3.6 Scintillationer

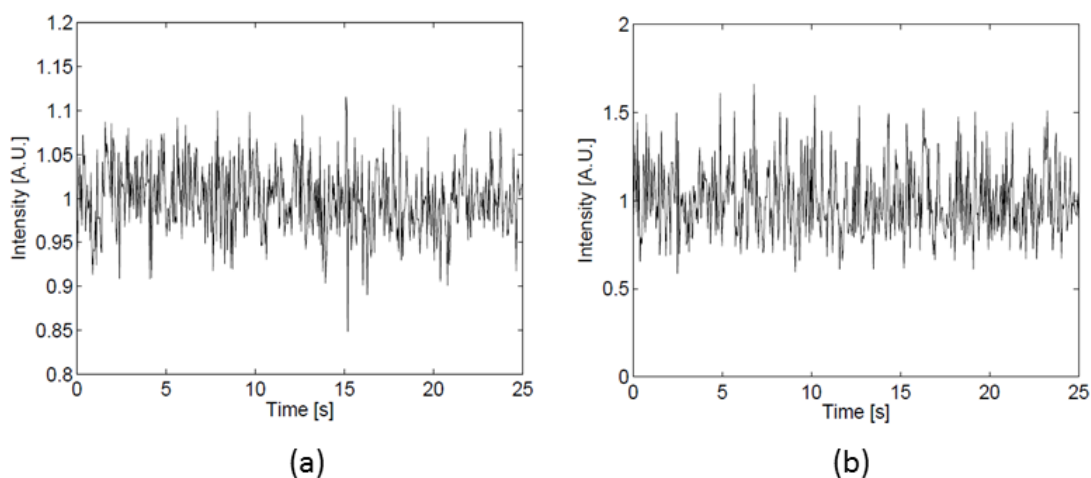
En laserstråle som utbreder sig genom turbulent luft kan beskrivas som att den passerar en uppsättning "luftpaket" som inbördes har små variationer i brytningsindex. Om luftpaketens storlek är mindre än stråldiametern kommer olika delar av strålens tvärsnitt möta olika brytningsindexvariationer och lokala avböjningar av ljuset kommer att ske inom strålens tvärsnitt. En effekt av detta är att man får en effektiv breddning av stråldiametern (medelvärde över tid) i tillägg till den breddning som sker på grund av diffraction. De avböjda delstrålarna kommer att slumpmässigt förstärka och försvaga varandra i takt med att laserstrålen färdas framåt. Dessa förstärkningar och försvagningar kommer att ge upphov till slumpmässiga intensitetsförändringar inom strålens tvärsnitt i både tid och rum, så kallade scintillationer.

Det är viktigt att hålla isär begreppen scintillationer som är intensitetsvariationer som uppkommer när laserljus utbreder sig genom en turbulent luft, och laserspeckel som är intensitetsvariationer som uppkommer i det reflekterade laserljuset från en diffus (matt) yta. Om man betraktar det spridda ljuset från en matt yta kommer alltid ett speckelmönster att ses, även om den belysande laserstrålen har ett idealt Gaussiskt stråltvärsnitt efter färd genom en helt turbulensfri atmosfär. Det är alltså inte intensitetsfördelningen i laserstrålen som är orsak till det sedda mönstret, utan det styrs av egenskaper hos den reflekterande ytan. Om den matta ytan istället ersätts med en lämplig detektor kommer detektorn avbilda den ideala gaussiska strålen utan speckelmönster. Detta kan kontrasteras mot scintillationsmönster som uppkommer av att strålen i sig själv har utvecklat intensitetsvariationer, vilka kommer att påverka signalen i detektorn i exemplet ovan.

Exempel på rumslig scintillation på grund av utbredning i turbulent luft kan ses i det gröna intensitetsmönstret i Figur 20 och exempel på tidsscintillation kan ses i Figur 21. Tidsvariationen beror på att vinden flyttar "luftpaketerna" relativt laserstrålen. Scintillationens egenskaper styrs av både av nivån på turbulensen och av storleksfördelningen på de ingående "luftpaketerna". Scintillation uppkommer, som nämnts tidigare, på grund av att laserns "delstrålar" växelverkar sinsemellan (förstärker respektive försvagar); ingen energi försvinner från laserstrålen, den "flyttas" bara mellan olika delar i tvärsnittet. Detta innebär att om man i en tillämpning där man mäter infallande effekt från en laser har en effektiv detektorarea som är större än strålens tvärsnitt (vid detektorn), så kommer inte scintillationen skapa något tidsbrus i den detekterade signalen. Motsatsen till en detektor som mäter hela strålen är en punktdetektor som bara mäter effekten i en punkt, här kommer scintillationerna generera brus i den detekterade signalen. Denna effekt, att storleken på detektorarean i förhållande till stråltvärsnittet styr bruset i en signal kallas för aperturutjämnning, och exemplifieras i Figur 20. De två röda rektanglarna i Figur 20 illustrerar två tänkta storlekar på den effektiva arean hos en detektor; då energin i strålen bara omdirigeras på grund av scintillation kommer detektor 2 uppvisa en mycket stabilare signal än detektor 1. Denna effekt kan också ses direkt i Figur 21 som visar två grafer från samma mättillfälle, med samma laserstråle och detektor. Den enda skillnaden mellan mätningarna var den effektiva detektorarean, där Figur 21(a) har en effektiv area som är ungefär 3 gånger större än arean i Figur 21(b). Vid jämförelse av de två graferna ses en tydlig effekt av aperturutjämnning i grafen från den större detektorarean. Signalen från den mindre detektorarean har brustoppar på runt 1.5 medan den större arean har brustoppar på runt 1.1 (viktigt att notera att skalorna på den lodräta axeln är olika, det gör att signalerna ser lika ut vid en första anblick).



Figur 20: Exempel på rumslig scintillation. Bilden (grön/svart) visar intensitetsfördelning i en laserstråle som har färdats 1 km genom en atmosfär med svag turbulens. Lasern var en Argonjonlaser med en våglängd på $0.515 \mu\text{m}$. De två röda rektanglarna, detektor 1 och detektor 2, indikerar två olika tänkta val av aperturstorlek. Bild: [FOI]³⁵



Figur 21: Exempel på scintillation i tid. Båda graferna kommer från samma laserstråle, detektor och mätobjekt, men med olika val på effektiv detektorarea. (a) svarar mot area på 5 mm i diameter och (b) mot en diameter på 3 mm. Vid jämförelse ses tydlig effekten av aperturutjämning på de uppmätta signalerna; Signalstyrkan i (a) varierar betydligt mindre än signalstyrkan i (b), notera att skalorna på den lodräta axeln är olika. Bild: [FOI]⁹

Så länge den minimala signalen är tydligt större än noll är scintillationer ett matematiskt hanterbart problem, där fluktuationerna ökar med avstånd och turbulensstyrka. Eftersom scintillationer är ett interferensfenomen så ger samma atmosfär en kraftigare effekt vid kort våglängd än vid lång våglängd. När fluktuationerna blir så starka att dalarna går ner till noll börjar man tala om stark turbulens, som är svårare att matematiskt beskriva och därmed även att beräkna effekterna av. Stark turbulens har ofta stora effekter på systemprestanda, och är inte ovanlig vid utbredning över flera kilometer nära marken.

Tillbaka till [Avståndsmätning](#), [Brytningsindex](#), [Fri optisk kommunikation](#), [Kontrast- och upplösningsförlust](#), [Laserutpekning](#), [Laservapen](#), [Refraktion](#), [Räckviddsförlust](#), [Strålvandring](#) och [Turbulens](#).

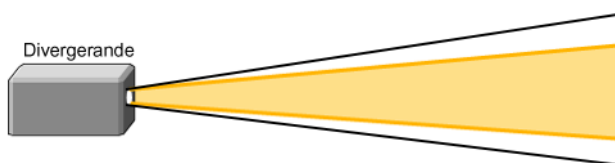
3.7 Strålavböjning

Om större sammanhängande temperaturskiktningar uppstår i atmosfären, till exempel inversionsskikt och ledskikt, kan storskaliga effekter som strålavböjning ske. En laserstråle går då inte längre rakt. Effekten är relativt vanlig nära marken över till exempel solbelysta asfaltsytor i vindstilla förhållanden, men kan också uppstå på högre höjd. Det innebär att en ljusstråle systematiskt ändrar sin utbredningsriktning på grund av avböjning i skiktgränserna (på grund av refraktion). Detta gör att föremål på långa avstånd, som geometriskt bör kunna ses, inte kan observeras eller träffas av en laserstråle. Denna systematiska ändring av utbredningsriktningen är också upphovet till mer välkända fenomen som hågringar.

Tillbaka till Refraktion och Störning av målsökare.

3.8 Strålbreddning

En laserstråle har på grund av diffractionen naturligt en viss divergens, som bestäms av det optiska systemet som den skickas ut genom. Men turbulensen i atmosfären påverkar laserstrålen så att den breddas, tvärsnittet på strålen blir större än om den hade utbredd sig samma sträcka i vakuum, en illustration av detta visas i Figur 22. Strålbreddning kan ses både momentant och som ett tidsmedelvärde, där tidsmedelvärdet beror på både den momentana strålbreddningen och strålvandringen.



Figur 22: De svarta linjerna visar hur en divergerande laserstråle breddas på grund av turbulens i atmosfären. Det gula området visar hur strålen breddas av den naturliga egenskapen diffraction.

Strålbreddbredden på målet kan approximeras med

$$w_{tot}^2 = \theta_{div}^2 z^2 + w_{turb}^2,$$

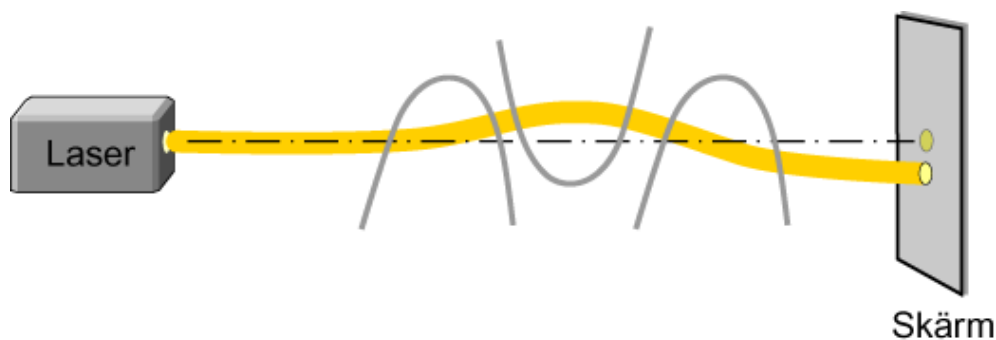
där w_{tot} är den totala strålradien, θ_{div} är divergensen uttryckt i radianer, z är utbredningssträckan och w_{turb} är bidraget från turbulensen. w_{turb} beror till exempel på våglängd, turbulensstyrka och på sträckan i atmosfären. Den växer snabbare än linjärt med avståndet. Man kan notera att den största faktorn av divergensbreddningen och turbulensbreddningen kommer att dominera, och att den mindre inte spelar så stor roll. Strålbreddning har alltså upp till ett visst avstånd eller turbulensnivå liten påverkan på systemprestanda, för att däröver snabbt försämrar prestanda. För en storleksordningsuppskattning kan w_{turb} vara 0,6 m för en 1 μm laser efter 5 km utbredning nära markytan

Tillbaka till Kontrast- och upplösningsförlust, Refraktion, Scintillation, Störning av målsökare, Termisk blomning och Turbulens.

3.9 Strålvandring

En laserstråle som utbreder sig genom turbulent luft kan beskrivas som att den passerar en uppsättning "luftpaket" som inbördes har små variationer i brytningsindex. Om luftpaketens storlek är *större* än strålens diameter kommer brytningsindexändringarna på grund av refraktion ändra hela strålens riktning, så kallad strålvandring (jämför med scintillation som blir effekten av "luftpaket" som är *mindre* än strålens diameter). En illustration av strålvandring kan ses i Figur 23.

Strålvandringen växer snabbare än linjärt med sträckan laserstrålen utbreder sig i en turbulent atmosfär. Ju längre sträckan genom atmosfären är, ju större kommer strålvandringen därmed vara relativt divergensen, och ju större påverkan på systemprestanda kommer den få. För 5 km utbredning nära markytan kan effekten vara några decimeters förflyttning av strålflecken på målet.

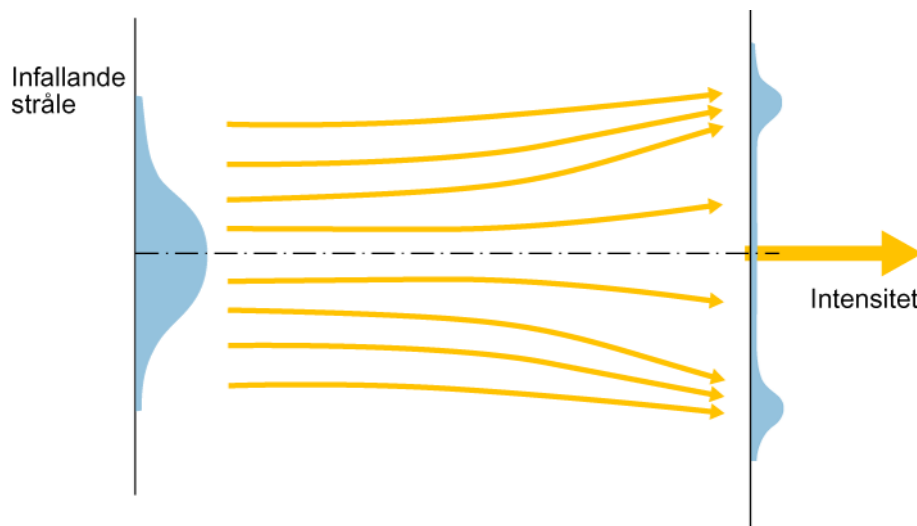


Figur 23: Illustration av strålvandring. Luftpaket som är större än strålens tvärsnitt orsakar ändringar i strålens riktning. Bild: [FOI]³⁵

Tillbaka till Kontrast- och upplösningsförlust, Laserutpekning, Laservapen, Refraktion, Strålbreddning och Turbulens.

3.10 Termisk blomning/Termisk distorsion

Termisk blomning, även kallad termisk distorsion, innebär att luftens brytningsindex ändras på grund av att intensiteten hos laserstrålen hettar upp luften i strålbanan. Det resulterar i strålbreddning och att intensitetsförändringar kommer mätas upp i strålens tvärsnitt efter en utbredningssträcka, se Figur 24. Problemet med termisk blomning ökar ju högre effekt lasern sänder ut och om målet har en liten vinkelhastighet samt att luften är stillastående. Men då målet har stor vinkelhastighet och atmosfären snabbt byts ut minskar påverkan.¹⁰



Figur 24: Figuren visar hur en infallande stråles tvärsnitts diameter ändras i intensitet vid uppvärmning av luften i strålbanan. Bild: [FOI]³⁵

Tillbaka till [Laservapen](#).

4. Atmosfärs- och väderfenomen

Det här kapitlet ger en överblick på olika atmosfärs- och väderfenomen som påverkar en laserstråle så att den sprids, absorberas, reflekteras eller bryts (refraktion).¹¹

4.1 Aerosoler

Aerosoler är små partiklar av stoft eller vätskedroppar i atmosfären eller någon annan gas. De påverkar utbredningen av laserstrålar genom spridning och absorption. Aerosoler varierar i storlek, form och koncentration men generaliseras till att ha en radie mellan 0,01 – 1 µm med en koncentration av 10 – 1000 partiklar per cm³. Förekomsten av aerosoler varierar, lokalt kan det finnas höga koncentrationer som påverkar transmissionen och därmed räckvidden för till exempel avståndsmätare.¹² Naturliga källor av aerosoler kommer ifrån ökenområden där vinden river upp sandpartiklar, havet där vinden växelverkar med vågor och bildar vattenbemängda saltpartiklar, vulkaniska utbrott och skogsbränder eller andra bränder till exempel vid eldgivning av krutvapen. Andra källor kan vara förbränning av kol, olja eller andra fossila bränslen, tillverkning av kemikalier från industrin, förbränning av biologiska material (gräs/halm på fält).¹³



Figur 25: Två typer av aerosoler visas i varsin figur. Till vänster ses brandrök från skogsbrand. Bild: [NASA]¹⁴ Till höger ses rökmoln från sand och grus som rivs upp vid förflyttning av fordon. Bild: [Försvarsmakten]



Figur 26: Två typer av aerosoler. Till vänster ses krutrök från eldgivning. Till höger ses havssalt, som i bilden försämrar den visuella sikten mest på längre avstånd med kusten som bakgrund. Bilder: [Försvarsmakten]

Där aerosoler har sina naturliga källor kan man förvänta sig att förekomsten av aerosoler är högre än över till exempel lövskog. Speciellt vid en brand eller vulkanutbrott då aerosolerna utbreder sig som rökplymer. Men aerosoler kan transporteras långa sträckor då till exempel vinden river upp små partiklar av sand och med hjälp av vertikala strömningar för upp aerosolerna högt upp i atmosfären. Aerosoler kan därmed transporteras i skikt av atmosfären som inte påverkar luften nära markytan. Man har till exempel visat på att partiklar från brandrök från USA har transporterats över Atlanten för att sedan falla ner över Europa. Det är luftmassans ursprung tillsammans med lokala förhållanden för mark och väder som ger aerosolinnehållet. Att kunna bestämma och förutsäga aerosolinnehållet i en luftmassa ger information om räckviddsförlusten.

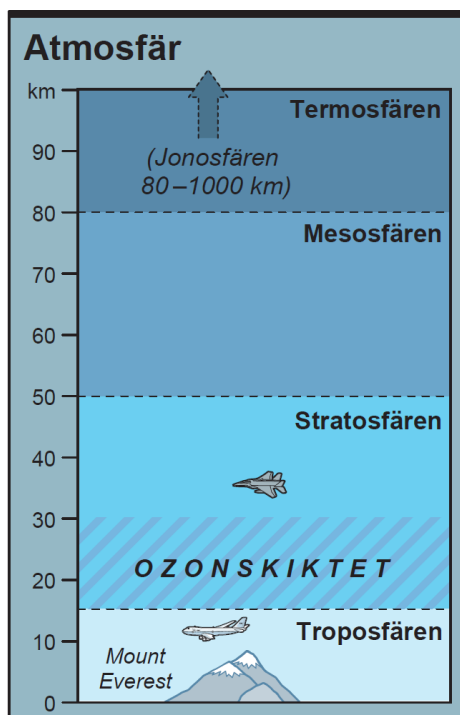
Eftersom aerosoler rör sig över stora områden samtidigt som de har lokala och tidsvarierande källor är det i dagsläget svårt att göra en prognos av förekomsten av aerosol på en viss plats. Ett alternativ att lösa problemet kan vara att mäta aerosolförekomsten med en uppgraderad laseravståndsmätare.

Vid hög relativ luftfuktighet fungerar aerosoler som kondensationskärnor där vatten ansamlas på aerosolpartiklarna. Höga halter av aerosoler ökar därmed risken för att torrdis bildas.

Tillbaka till Absorption, Atmosfärens struktur, Avståndsmätning, Dammoln och sandstormar, Dis, Dämpning, Fri optisk kommunikation, Inversionsskikt, Laserkorona, Laserutpekning, Laservapen, Laservarnare, Luftfuktighet, Spridning, Upplösning och synfält och Vind.

4.2 Atmosfärens struktur

Atmosfären sträcker sig ut till cirka 100 km för att sedan tunnas ut. Någon övre gräns när atmosfären slutar finns inte. Cirka 99 % av atmosfärens massa finns inom 40 km från marken där hälften av den massan finns under de första 5–6 km. Strukturen på atmosfären ändras med höjden, se Figur 27, där det som kallas för väder sker i troposfären, vilket är lagret närmast markytan.^{15, 16} Atmosfären består av olika gaser och aerosoler där torr luft består av ungefär 78 % kvävgas (N_2), 21 % syrgas (O_2), 0.9 % Argon (Ar) och 0.04 % koldioxid (CO_2); den kvarvarande delen består av andra gaser i små mängder, till exempel ozon (O_3). Mängden vattenånga (H_2O) i luften, luftfuktigheten, varierar beroende på geografi, årstid och rådande väder.



Figur 27: Figuren visar hur atmosfären delas in i fem olika lager. De fem olika skikten delas in efter temperaturförändringen som sker i altitud. I tropo-, meso- och jonosfären sjunker temperaturen med höjden. I strato- och termosfären däremot ökar temperaturen med höjden. Mellan skikten befinner sig ett lager där temperaturgradienten byter riktning den kallas tropo-, strato, meso- och termopausen. Utsträckningen i vertikalled för pauserna varierar beroende på plats på jorden och tid på året. Bild: [FOI]¹⁷

Tillbaka till Aerosoler och Brytningsindex.

4.3 Brytningsindex

Ljus utbreder sig i ett medium, exempelvis luft, och illustreras idealt som en stråle med en pil i färdriktningen, men i det faktiska fallet har en ljusstråle utsträckning i 3 dimensioner i så kallade lober. Vid övergången mellan två medium, till exempel luft till glas eller från luft till vatten bryts laserstrålen. Brytningen beskrivs av ett brytningsindex, även kallat *refraktionsindex* som per definition är:

$$n = \frac{c}{v},$$

där n är brytningsindex, c är ljushastigheten i vakuum och v är utbredningshastigheten i det aktuella mediet. Utbredningshastigheten för ljuset (lasern) i ett medium bestäms beroende på mediets magnetiska- och elektriska egenskaper. Tabell 1 listar några brytningsindex för olika medier.¹⁸

Tabell 1: Brytningsindex för några medium i gas-, vätske- och solidform¹⁸.

Medium	Brytningsindex n
Vakuum	1
Luft	1,00029
Koldioxid	1,00045
Vatten	1,333
Is	1,309

Men speciellt i mediet gas (till exempel luft) är brytningsindex kopplat till densiteten enligt Gladstone-Dale ekvationen:

$$n - 1 = \sum K_i \rho_i,$$

där n är brytningsindex, K_i är Gladstone-Dale konstanten för gasen i och ρ_i är dess densitet. Bidragen från de olika ingående gaserna summeras (visas av summatecknet $\sum$) för att räkna ut gasblandningens brytningsindex. Luft kan bilda olika stora luftpaket med olika densitet vilket resulterar i varierande brytningsindex som bland annat ger upphov till scintillation och refraktionsfenomen. Luftens densitet kan beskrivas enligt ideala gaslagen som:

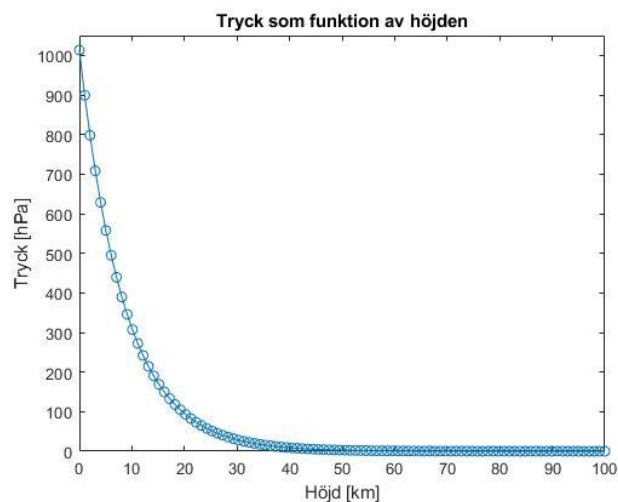
$$\rho = \frac{PM}{RT} = \frac{nM}{V},$$

där är ρ densiteten, P är trycket, M är molmassan, R är gaskonstanten, T är temperaturen, n är substansmängd och V är volym. Här kan man då se att om trycket avtar eller temperaturen ökar så avtar densiteten och därmed även brytningsindex.

I atmosfären avtar lufttrycket med höjden, enligt den barometriska höjdformeln, vilket medför att brytningsindex avtar.¹⁹ Den barometriska höjdformeln beskrivs av en exponentialfunktion där P är lufttrycket, P_0 är lufttrycket vid havsnivå, g är tyngdaccelerationen, h är höjden, M är luftens molmassa, G är gaskonstanten och T är temperaturen, enligt:^{19, 20}

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{ghM}{TR}\right).$$

I Figur 28 visar grafen hur trycket avtar med höjden, för en konstant temperatur, observera att temperaturvariationerna från atmosfärens struktur inte visas i Figur 28.



Figur 28: Figuren visar hur lufttrycket avtar med höjden.

Men temperaturen i luften avtar i regel med höjden (förutom i stratosfären, termosfären och vid inversion), vilket medför att brytningsindex ökar. Trycket och temperaturen motverkar varandra men sammantaget sjunker densiteten med höjden och således även brytningsindex.

Tillbaka till Aktiv avbildning för hotidentifiering, Fri optisk kommunikation, Hägring/ledskikt, Inversionsskikt, Kontrast- och upplösning förlust, Laserbländning, Laserkorona, Refraktion, Scintillation, Strålvandring, Störning av målsökare, Termisk blomning och Turbulens.

4.4 Dammoln och sandstormar

I ökenområden förekommer sandstormar där sandkornens storlek varierar mellan några få mikrometer till flera millimeter. Koncentrationen av sandkornen varierar och transmissionen igenom en sandstorm är låg i det visuella området.

Dammoln uppkommer när hård vind blåser över öppna torra ytor där grus och damm ligger på marken, vid till exempel förflyttning av trupp på grusvägar då friktionen från däck och band river upp grus och damm från marken i atmosfären (se högra bilden i Figur 25 i avsnitt 4.6 Aerosoler) och vid landning av helikoptrar, då lufttrycket från rotorbladen bidrar till att damm virvlar upp från marken och försämrar sikten, se Figur 29.

Dammoln och sandstormar är fysikaliskt mycket höga koncentrationer av aerosoler. De kan lokalt, nära källan, också innehålla större partiklar, och därmed även påverka längre våglängder i MWIR och LWIR. Sand och dammpartiklar består av en rad olika ämnen och mineraler så som kisel, aluminium, kalcium och järn.



Figur 29: Helikopter 16 utsätts vid landning, framför allt i ökenområden, för en så kallad brownout. Aerosoler i form av små sandpartiklar rivs upp av lufttrycket från rotorbladen och skapar ett dammoln runt helikoptern som begränsar sikten. [SAE]²¹

Stoftmoln från kraftiga sandstormar kan ibland transporteras långa sträckor på hög höjd för att falla ner över ett område långt ifrån källan. Sandpartiklarna är så små att vinden för med sig sandkornen som sedan kan falla ut som nederbörd i ett annat område, det fenomenet kallas för blodregn eller röd snö. Till exempel kan sand från Saharaöknen transporteras högt i atmosfären för att falla ner över Skandinavien. Detta är en mycket svåröversäglig källa till aerosoler.

Tillbaka till Aerosoler och Vind.

4.5 Dimma

En ansamling av små vattendroppar eller iskristaller som begränsar den horisontella sikten under 1 km kallas dimma.

(SMHI:s kunskapsbank, 2017) ²²

Dimma består av små vattendroppar i storleksordningen 1–20 μm (0,001–0,002 mm) som svävar i luften.⁵
²² Koncentrationen för dimma varierar mellan 10 till 100 partiklar per cm^3 , se Tabell 2 i [Appendix A.1](#). Skillnaden mellan [dis](#) och dimma avgörs av det visuella siktförhållandet. Men observera att även nederbörd påverkar sikten så att den kan understiga 1 km men att det för den delen inte kallas för dimma. Dimma är en form av [moln](#) med basen vid markytan. I dimma ligger luftfuktigheten mellan 95–100%.²² Vattendropparna i dimma sprider ljuset och kan ge en [laserkorona](#) kring en utsänd stråle.



Figur 30: Vid dimma är den visuella sikten kortare än 1 km. [Försvarsmakten]

Dimma sprider och absorberar ljuset från en laserstråle vilket orsakar [räckviddsförluster](#). I och med att dimdroppar är mellan 1–10 μm så kommer kameror som använder sig av [NIR](#), [SWIR](#), [MWIR](#) och [LWIR våglängder](#) få en spridning på ljuset som följer [Mie-spridningen](#). Är våglängden mindre än dropparnas storlek, i detta fall undre delen av NIR samt hela visuella och UV-området, kommer spridningen domineras av geometrisk spridning. Beroende på storleksfördelningen på dropparna kan effekten av dimma variera väldigt mycket vid längre våglängder i MWIR och LWIR. Så länge dropparna är mindre än våglängden kan effekten vara relativt liten, men om dropparna är lika stora eller större än våglängden så påverkas sikten i IR lika mycket som i visuellt.

Tillbaka till [Aktiv avbildning för hotidentifiering](#), [Dis](#), [Dygnsvariationer](#), [Dämpning](#), [Inversionsskikt](#), [Laserkorona](#), [Luftfuktighet](#) och [Spridning](#).

4.6 Dis

Dis delas upp i två typer fukt- eller torrdis. Fuktdis kallas fenomenet då ljuset sprids och absorberas av vattendroppar. Torrdis kallas fenomenet då ljuset sprids och absorberas av rök, andra aerosoler eller att den relativa luftfuktigheten understiger 80 %. Rent fysikaliskt finns den ingen skillnad mellan dis och dimma utan fenomenen är definierat utifrån det visuella siktförhållandet, inte beroende på vilken storlek dropparna har. Vid dis är sikten mellan 1–10 km och om sikten understiger 1 km så kallas fenomenet för dimma.^{16, 22} Sikten bestäms av dropparnas koncentration och storlek, vilket varierar.



Figur 31: Vid fuktdis är den visuella sikten längre än 1 km men kortare än 10km. Bild: [Försvarmakten]

När våglängden från en laserstråle är av samma storleksordning som dropparnas radie beskrivs spridningen av så kallad Mie-spridning. Att känna till dropparnas storlek vid disiga förhållanden är väsentligt för att uppskatta räckviddsförlusten. Bland annat för att dis ger kontrastförluster i en bild på grund av att ljuset sprids och därmed bidrar till att inte kunna urskilja ett objekt från bakgrunden. Dropparna bidrar även, på grund av sin förmåga att sprida ljuset, till minskad medeleffekt som skulle kunna träffa ett mål vid användning av till exempel laservapen. Generellt gäller att då dropparna är i storleksordningen någon mikrometer kommer IR kameror för längre våglängder ge en bra bild trots att den visuella sikten är låg.

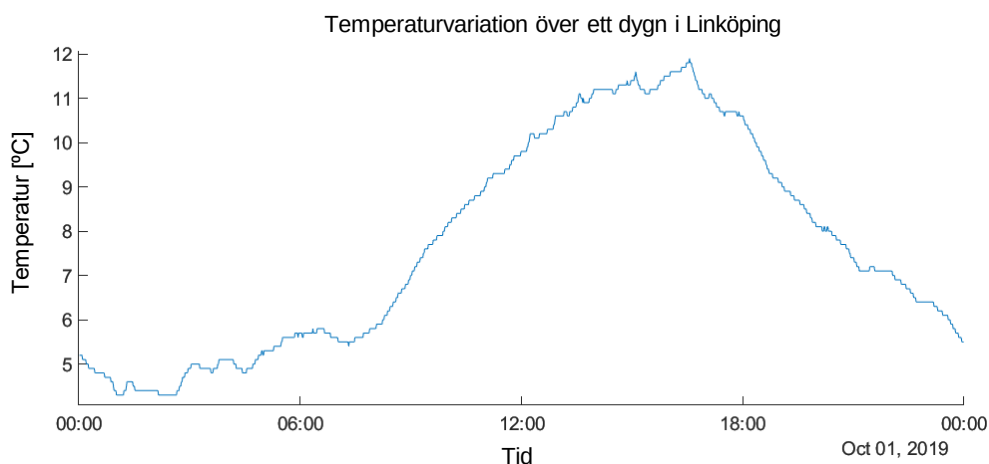


Figur 32: Vid torrdis sprids och absorberas ljuset på grund av förekomsten av rök och andra aerosoler. Bild: [Allmän egendom]²³

Tillbaka till Aerosoler, Dimma, Dygnsvariationer, Laserutpekning och Luftfuktighet.

4.7 Dygnsvariationer

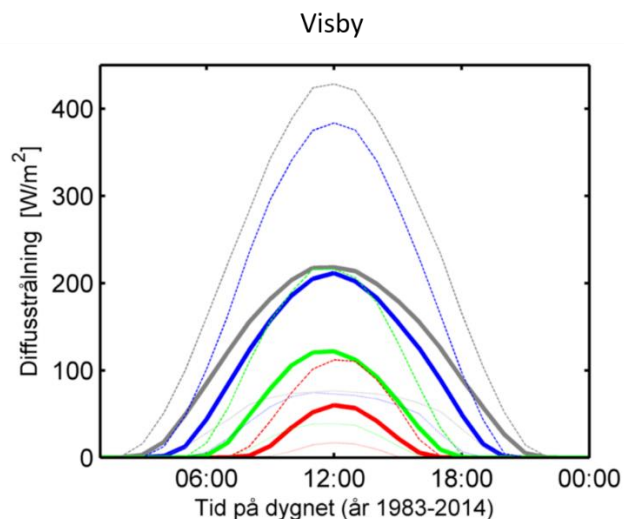
Det rådande vädret förändras över dygnet och årstiderna. Det finns dock periodiska variationer i grunden som beror på solinstrålningen, och hur högt solen står på himlen. Detta leder både till årstiderna och till att det normalt är varmare på dagen än på natten. De periodiska dygnsvariationerna är tydligast vid högtryck med klart väder, medan moln och frontpassager kan ge andra förhållanden. I Figur 33 visas ett exempel på hur temperaturen varierar över ett dygn.



Figur 33: Temperaturen varierar normalt över dygnet på grund av uppvärmning från solen på dagen och avkylning på natten. Mätdata från väderstationen som sitter på FOI:s tak i Linköping visar att temperaturen på natten är lägre än temperaturen på dagen den 1 oktober 2019.

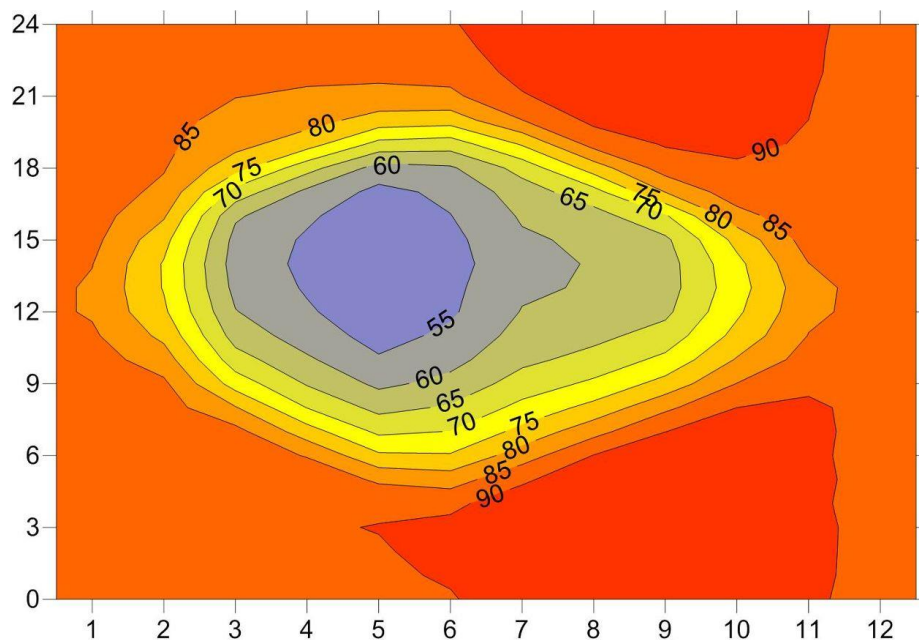
Turbulensen har ett annat beteende än temperaturen med minima i gryning och skymning, och högre värden både på natten och på dagen. Detta beror på att turbulensen drivs av temperaturskillnader. Men variationerna är stora och periodiciteten sker vid främst högtryck och klart väder.

Solinstrålningen varierar över dygnet och i Figur 34 visas hur den diffusa solinstrålningen har varierat över årstiderna och över dygnet i Visby sedan man började mäta solstrålning på Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI).



Figur 34: Figuren visar hur den diffusa strålningen har varierat i Visby mellan åren 1983 till 2014. De heldragna linjerna visar medelvärdet för varje timme på dygnet där den röda linjen visar januari, den gröna oktober, den blå april och den grå juli. De streckade linjerna visar de övre och undre gränserna inom vilka 95% av de uppmätta värdena finns. Bild: [SMHI]²⁴

Den relativa luftfuktigheten varierar över dygnet och årstiden. I Figur 35 ses att den relativa luftfuktigheten är som störst på natten under hösten och att den är som lägst mitt på dagen i slutet på våren. När den relativa luftfuktigheten ökar till höga värden så kan dis och dimma bildas, vilket leder till försämrad sikt. Detta sker framförallt nattetid eftersom temperaturen då sjunker, medan dimman sedan försvinner när luften värms upp igen på dagen.



Figur 35: Figuren visar dygns-(timmar på y-axel) och årsvariation(månader på x-axel) för medelvärdet av den relativa luftfuktigheten i Arvika mellan åren 1996–2012. Den relativa luftfuktigheten anges i procent i figuren. Bild: [SMHI]²⁶

Tillbaka till Hägring/ledskikt, Luftfuktighet och Turbulens.

4.8 Inversionsskikt

Ibland förhindras luftens rörelser i vertikalled av ett fenomen som kallas inversion. Detta påverkar både luftkvalité, moln- och nederbördsbildning. Inversion, även kallat spärrskikt eller extremt stabil skiktning, är ett skikt i atmosfären där temperaturen ökar med höjden. (SMHI:s kunskapsbank, 2018)²⁵



Figur 36: Bilden visar en temperaturinversion över staden Almaty i Kazakhstan. Strax över den grå dimman ökar temperaturen och bildar en stabil skiktning som gör att det inte blir något utbyte av luften i vertikalled. Bild: [Creative Commons]²⁵

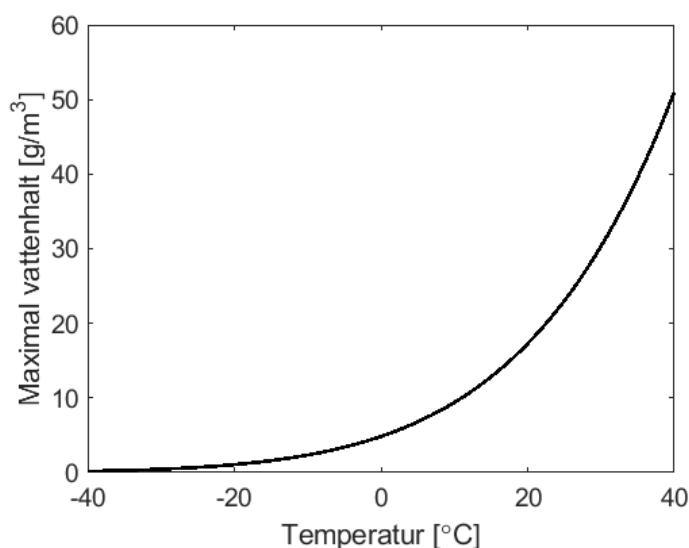
När ett inversionsskikt bildas över en stad kan föroreningarna bli uppenbara eftersom omblandningen av luft i vertikalled är dålig. Föroreningar (till exempel [industri aerosoler](#)) tillsammans med [dimma](#) bildar smog och försämrar sikten samt luftkvalitén.

Inversion kan leda till att [moln](#) bildas precis under inversionsskiktet som i sin tur försämrar räckvidden. Inversionen påverkar indirekt de räckviddsförluster som uppstår när smog och moln bildas eftersom dessa väderfenomen uppstår vid inversion. Inversionsskiktet påverkar även ljusets utbredning eftersom temperaturen ökar och således minskar [brytningsindex](#).

Tillbaka till [Brytningsindex](#), [Refraktion](#), [Strålvbøjning](#), och [Turbulens](#).

4.9 Luftfuktighet

Atmosfären innehåller vattenånga där mängden eller andelen vattenånga bestämmer luftfuktigheten. Man skiljer på absolut- och relativ luftfuktighet. Den absoluta luftfuktigheten anger den faktiska mängden vattenånga i g/m^3 . Den relativa luftfuktigheten ges i procent och är andelen vattenånga som förekommer av den maximala vattenånga som kan finnas vid den aktuella lufttemperaturen. Luftfuktigheten är beroende av temperaturen och förhåller sig så att desto varmare det är ju mer vattenånga kan finnas i luften, således stiger den maximala halten vattenånga med stigande temperatur, se Figur 37, medan den relativa luftfuktigheten sjunker för stigande temperatur (givet att den absoluta luftfuktigheten är konstant). Även trycket avgör vilken luftfuktighet som råder. Vattenånga tillförs i atmosfären genom avdunstning från hav, sjöar, mark och vegetation. Beroende på den geografiska positionen, tiden på året och rådande väder så varierar luftfuktigheten.²⁶



Figur 37: Figuren visar hur mycket vattenånga per kubikmeter som luften kan innehålla vid olika temperaturer.

Vattenånga dämpar starkt utbredningen av ljus i vissa våglängdsområden på grund av absorption. Till exempel är transmissionen mycket låg i våglängdsområdena kring 1,5, 1,9, mellan 2,5–3 och 5–8 μm på grund av vattenångans förmåga att absorbera ljus vid de våglängderna, se Figur 44 i kapitel 5.1 Absorption. Det är den absoluta luftfuktigheten som bestämmer molekylabsorptionen, medan den relativa luftfuktigheten påverkar transmissionen genom att aerosoler växer i storlek genom kondensation vid hög relativ luftfuktighet samt genom att dis och dimma bildas när den relativa luftfuktigheten närmar sig 100 %.

I Sveriges inland ligger den relativa luftfuktigheten under juli månad mellan 70–80 %. Medan under januari så ligger genomsnittet på 85–95 %. Vid kusten är den relativa luftfuktigheten högre än vid inlandet pga. avdunstning från havet och att havet kyler luften. Luftfuktigheten varierar över dygnet, se kapitel 4.11 Dygnsvariationer.²⁶

Tillbaka till Absorption, Atmosfärens struktur och Dygnsvariationer.

4.10 Moln

När fuktig luft tvingas röra sig uppåt och avkyls kondenserar vattenångan i luften och blir till små vattendroppar som tillsammans bildar ett moln.²⁷ Dimma är ett moln med basen vid jordytan.²⁸

Ett moln är en massa droppar eller frysta kristaller svävande i luften ovanför jorden. Dessa droppar eller iskristaller är vanligen i storleksordningen 0,01 mm.
(SMHI:s kunskapsbank, 2014)²⁹



Figur 38: Cirrusmoln, även kallat slöjmoln, har högst transmission på grund av öppningarna mellan den låga koncentrationen av vattendropparna. Till vänster: Cirrostratus med stratusmoln framför solen. Bild: [Freeimages]³⁰
Till höger: Cirrocumulus Bild: [Freeimages]³¹

Radien hos dropparna i moln varierar beroende på typen men ligger runt 1–10 μm , se Tabell 2 i [Appendix A.1](#). Det optiska våglängdsområdet sträcker sig mellan 0,2–14 μm vilket betyder att spridningen av ljuset på grund av moln kommer domineras av Mie-spridning. Det beror på att vattendropparna i moln är av ungefär samma storleksordning som våglängden, men ibland kan molndroppen växa sig så stor att den har en radie på 50 μm , se Tabell 3 i [Appendix A.1](#), övergår spridningen till geometrisk spridning.

Moln varierar i utsträckning och koncentration över tid. Vissa molntyper, till exempel cumulus, har mycket låg transmission medan cirrusmoln har en lägre extinktionskoefficient och därmed en större transmission. Att känna till vilken molntyp som förekommer i synfältet ger förutsättningar att kunna förutsäga användbarheten hos ett elektro optiskt system.

Tillbaka till [Dimma](#), [Dämpning](#), [Inversionsskikt](#) och [Nederbörd](#).

4.11 Nederbörd

Nederbörd är ett meteorologiskt samlingsnamn för flytande eller fasta vattenpartiklar som faller igenom atmosfären.

(SMHI:s kunskapsbank, 2017) ³²

Nederbörd bildas när hav, sjöar och mark värms upp av solen och vattnet avdunstar så att vattenånga bildas i atmosfären. Uppåtvindarna för vattenångan uppåt i atmosfären och kyler ner den så att ångan kondenseras och bildar moln och nederbörd. Nederbörd förekommer i olika former när den når marken beroende på vilken temperaturen och fuktigheten dropparna har passerat igenom när de fallit igenom atmosfären.³²

Radien hos en regndroppe är i storleksordningen 100–10 000 μm (0,1–10 mm), se Tabell 2 och Tabell 3 i [Appendix A.1](#). Det optiska våglängdsområdet sträcker sig mellan 0,2–14 μm , vilket betyder att nederbördsdroppar är mycket större än ljusets våglängd. Därför kommer geometrisk spridning av ljuset att dominera. Den geometriska spridningen innebär att droppen kan ses som ett geometriskt objekt med ett visst brytningsindex och ljuset kan approximeras till en stråle som bryts eller reflekteras i droppen.



Figur 39: Här ses framryckning av stridsfordon 90 och stridsvagn 122 på övningsfältet på Gotland den 5 februari 2018. Lättare nederbörd i form av snö försämrar sikten. Bild: [Försvarmakten]

Intensiteten på nederbörden har betydelse för sikten. Koncentrationen av vattendropparna är förhållandevis sett låg, cirka 10^{-5} – 10^{-2} cm^3 , eftersom små droppar absorberas av stora droppar vid nederbördsbildningen. Men generellt kommer transmissionen att vara lägre för ett kraftigare regn än vid lätt duggregn eftersom spridningen kommer ske fler gånger under nederbörd med högre intensitet. Vid nederbörd sker ofta också en indirekt försämring av sikten eftersom dropparna och snön fastnar på fönsterrutor och ger brytningsfenomen som förvränger bakgrunden, se Figur 40. Nederbörd har även en förmåga att kyla ner och öka fuktigheten på material som bidrar till att IR-kontrasten blir lägre mot bakgrunden och att reflektansen i till exempel SWIR sjunker. Dessa indirekta effekter kan påverka prestanda lika mycket eller mer än transmissionsförlusterna i atmosfären.



Figur 40: Vid nederbörd i form av regn bildas optiska fenomen då betraktaren står i rätt vinkel i förhållande till det infallande solskenet. I bilden syns en regnbåge som uppkommer då solinstrålningen bildar en vinkel på 42 grader i vattendroppen. Indirekta försämringar av sikten vid nederbörd fås från vattendroppar som fastnar på fönsterrutor och ger brytningseffekter. Bild: [Försvarsmakten]

Nederbörd i form av snö fungerar som små prismor och har varierande storlek allt från ett par mikrometer till flera millimeter. Därför uppstår flertalet optiska fenomen i atmosfären beroende på solinstrålningens vinkel i förhållande till vinkeln hos observatören, till exempel en halo, se vänstra bilden i Figur 38 i avsnitt 4.7 Moln eller regnbåge se Figur 40.

Eftersom droppradien och snöflingor är mycket större än våglängden vid nederbörd kommer transmissionen för alla optiska våglängder ändras på likartat sätt, det är således oftast inte bättre att använda en IR-kamera än en visuell kamera vid nederbörd.

Tillbaka till Laserkorona, Spridning.

4.12 Rökplymer

Rök bildas på olika sätt men utgår från en källa som orsakar röken. Källan kan till exempel vara förbränning av kol, industri eller en explosion från krut. Rök kan också skapas medvetet med hjälp av t.ex. rökgranater för att försämra prestanda för fiendens optiska system. På avstånd kan det vara svårt för en observatör att skilja på ett moln som består av vatten eller ett så kallat artificiellt moln som är skapat från industrin.³³ Röken från källan har ett flöde som bidrar till att rök utbreder sig som plymer i atmosfären. Plymernas utseende och spridning i atmosfären beror bland annat på den rådande temperaturskiktningen.

En rökplym är fysikaliskt sett en lokalt förhöjd koncentration av aerosoler, och de optiska effekterna från partiklarna i röken är desamma. Även den kemiska sammansättningen av atmosfären är ofta förändrat i en rökplym med olika restprodukter från förbränningen, vilket kan leda till absorption i våglängdsområden där transmissionen i vanliga fall är god.



Figur 41: Skogsbranden i Kårböle 2018. Röken stiger uppåt i form av plymer. Bild: [Försvarmakten]

Tillbaka till Aerosoler, Aktiv avbildning för hotidentifiering, Dis, Fri optisk kommunikation och Laserutpekning.

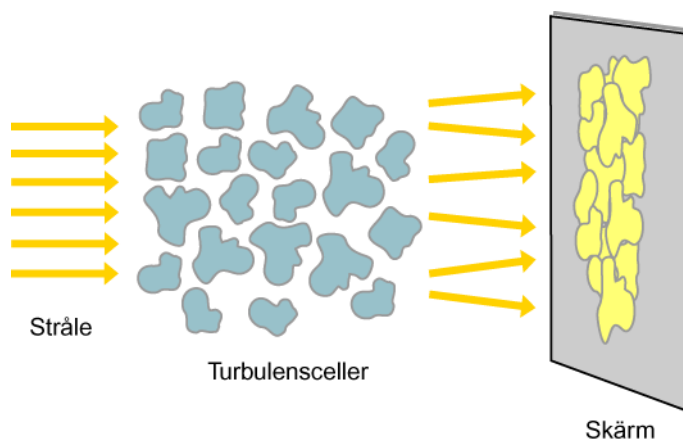
4.13 Turbulens

Optisk turbulens kan enkelt observeras när man betraktar ett föremål över uppvärmd terräng. Föremålet blir otydligt och på en bildsekvens ser föremålet ut att darra/vibrera. Turbulenseffekter orsakas av stokastiska variationer i luftens brytningsindex. Turbulensen drivs framförallt av att luftmassor med olika brytningsindex blandas. Detta händer till exempel när solen värmer upp marken, och därmed indirekt luften nära markytan. Luften längre upp värms inte upp av marken och har därför annat brytningsindex. När luftlagren med olika brytningsindex blandas skapas optisk turbulens. På högre höjd är densiteten lägre och variationer i temperatur oftast långsammare, varför turbulensen oftast avtar med höjden. Vid inversion kan temperaturskillnader leda till förhöjd turbulens i gränsskiktet mellan olika luftmassor på högre höjd. Optisk turbulens leder till fenomen som strålvandring, strålbreddning och scintillationer. Ett extremt fall som tydligt illustrerar effekten av optisk turbulens är när varma motoravgaser från en helikopter pressas ned av rotorbladen och blandas med omgivande luft i atmosfären, se Figur 42.



Figur 42: Turbulens orsakad av helikoptern påverkar upplösningen i bilden. Skillnaden syns tydligt på skogsridån under helikoptern i jämförelse med det nedre högra hörnet i bilden. Bild: [Försvarmakten]

En turbulent atmosfär delas in i områden, så kallade luftpaket eller turbulensceller, med slumpmässiga variationer i brytningsindex som är resultatet av fluktuationerna i densitet orsakade av bland annat temperaturskillnader i luftpaketen, se Figur 43. Laserstrålen bryts upp och fasförskjuts vilket resulterar i att ljuset från olika platser kommer fram med olika effekt och vid olika tider till en skärm som mottagaren har. Det leder till att bilden ser ut att darra/vibrera.



Figur 43: Figuren visar hur en laserstråle påverkas av en turbulent atmosfär där turbulenscellerna är mindre än stråldiametern. Bild: [FOI]³⁵

Små luftpaket som är mindre än stråldiametern orsakar lokala avböjningar inom strålens tvärsnitt och bryter sönder den i delstrålar. Dessa interfererar med varandra slumpmässigt och orsakar en

intensitetsfördelning med snabba lokala fluktuationer, även kallat scintillation, som ger stråltvärsnittet ett fläckigt utseende. De små luftpaketen kan konceptuellt ses som en slumpvis uppsättning med väldigt svaga konvergerande/divergerande linser av varierande diameter och orientering. En turbulent atmosfär kommer även öka divergensen hos laserstrålen och slumpmässigt ändra riktningen på strålbanan, det ger effekter som strålvandring och strålbreddning. Turbulensen varierar beroende på uppvärmning av markytan, tid på dygnet och vindstyrkan. Det är större turbulens över städer och i bergstrakter än över hav och stora slätter. Turbulensen är vanligtvis även kraftigare på dagen än på natten men allra lägst i gryning och skymning, se dygnsvariationer.^{34, 35}

Tillbaka till Aktiv avbildning för hotidentifiering, Avståndsmätning, Dygnsvariationer, Fri optisk kommunikation, Kontrast- och upplösning förlust, Laserbländning, Laserutpekning, Laservapen, Laservarnare, Ledstrålesystem, Optikspaning, Refraktion, Räckviddsförlust, Scintillation, Strålbreddning, Strålvandring, Störning av målsökare, Upplösning och synfält och Vind.

4.14 Vind

Vind är flödet av luft i atmosfären. Skillnader i lufttryck får luften att röra sig från områden med högtryck till områden med lågtryck. Ju större tryckskillnad desto kraftigare vind.
(SMHI:s kunskapsbank, 2018)³⁶

Vid skjutning med skjutvapen bör man ta hänsyn till vinden eftersom den påverkar projektilens bana genom atmosfären. Men en laserstråle däremot påverkas inte på samma sätt av vinden, utan vinden har främst indirekta effekter.

När det blåser blandas luften ur olika luftlager och temperaturskillnader jämnas ut. Därmed försvinner generellt risken för ledskikt och hägringar. Utjämnningen av temperaturskillnader minskar också skillnaderna i brytningsindex som leder till optisk turbulens.

Stark vind kan öka aerosolinnehållet i luften, särskilt över havet där vinden bryter sönder vågor och frigör saltpartiklar. Detsamma gäller när vinden blåser över sandområden eller bar jord och river upp partiklar som skapar dammoln. När vinden blåser över ett snöbetäckt område kan snörök bildas som försämrar sikten. Snöröken består av små iskristaller med varierande storlek och form.

Vindriktning anges som den riktningen varifrån det blåser. En västlig vind blåser från väster till öster. Vindstyrkan mäts oftast i meter per sekund (m/s) men har olika benämning beroende på om vinden är över land eller sjöss.³⁷

Tillbaka till Aerosoler, Dammoln och sandpartiklar och Scintillationer.

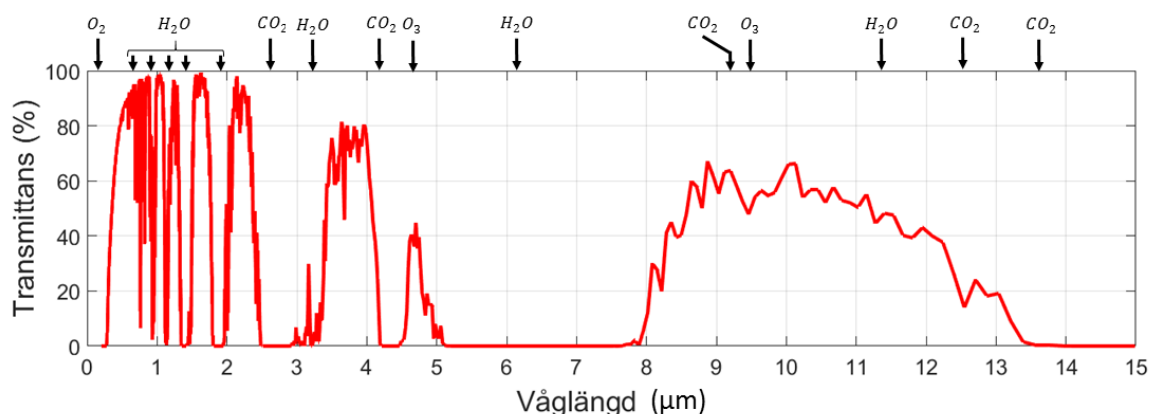
5. Fysikaliska processer

När en laserstråle utbreder sig genom atmosfären sker en växelverkan dem emellan. I detta kapitel kommer de dominerande växelverkansmekanismer kortfattat beskrivas.

5.1 Absorption

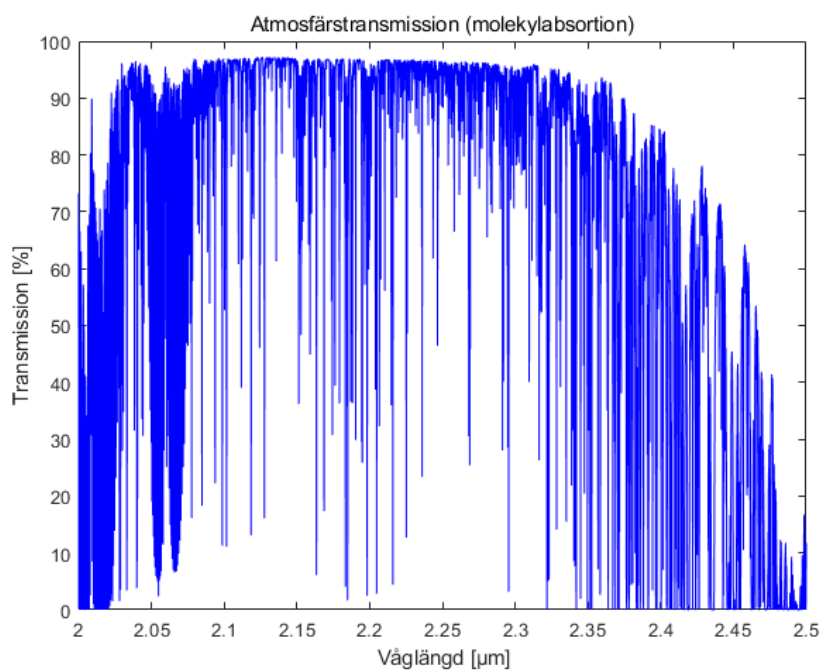
Luften består av olika gaser och aerosoler (det vill säga stoftpartiklar och små droppar som svävar i luften). Torr luft består av ungefär 78 % kvävgas (N_2), 21 % syrgas O_2 , 0,9 % Argon (Ar) och 0,04 % koldioxid (CO_2); den kvarvarande delen består av andra gaser i små mängder, till exempel ozon (O_3). Mängden vattenånga (H_2O) i luften, luftfuktigheten, varierar beroende på geografi, årstid och väderlek.

Ljus kan absorberas av luften i atmosfären, och det är gasernas och aerosolernas kemiska komposition som styr vid vilka våglängder. Om man vet luftens sammansättning kan man ta fram ett så kallat absorptions/transmissionsspektrum, och i Figur 44 visas ett sådant transmissionsspektrum för luft utan aerosoler. Figur 44 visar exempel på transmission efter en 10 km sträcka i havsnivå utan närvaro av aerosoler, och pilarna indikerar de olika gasernas bidrag till våglängdsområden med hög absorption. Vid de våglängder i figuren där H_2O anges som det dominerande bidraget kommer luftfuktigheten, som varierar över tid, har stor påverkan på absorptionen.



Figur 44: Beräknad transmission i luft efter en 10 km sträcka i havsnivå. Transmissionsfönstren brukar anges som 0,2–1,3 μm , 1,5–1,7 μm , 2,0–2,5 μm , 3,0–5,0 μm och 8–14 μm (med ett absorptionsband för CO_2 vid 4,2–4,4 μm).

Vid lasertillämpningar där man till exempel vill belysa objekt på långa avstånd är det viktigt att välja våglängd på ljuset med luftens absorption i åtanke. I Figur 45 visas ett exempel på hur molekylabsorptionen i atmosfären påverkar transmissionsfönstret 2–2,5 μm . Man försöker välja våglängder som ligger i så kallade transmissionsfönster där absorptionen av laserljuset är låg.

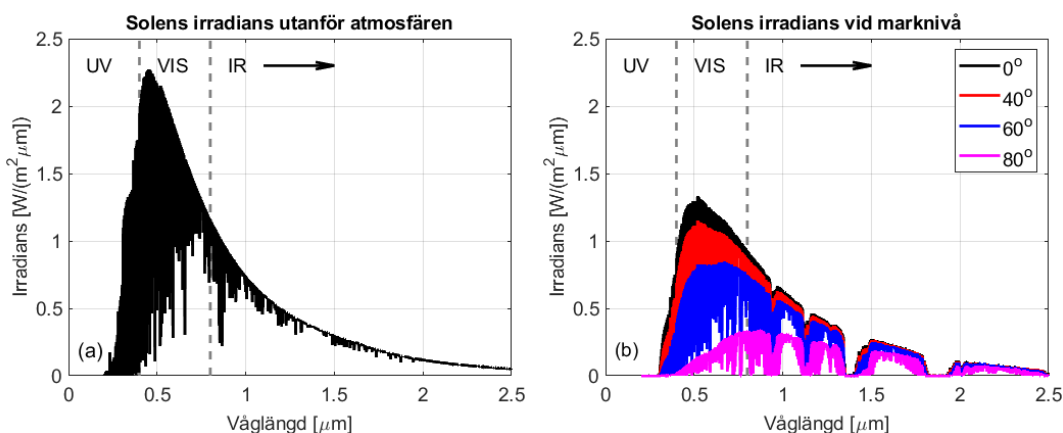


Figur 45: I figuren visas transmissionen för våglängdsområdet 2–2,5 μm av luftens molekyler då utbredningssträckan är 3 km lång och horisontellt 2 meter över markytan. Beräkningen är gjord med programmet HITRAN då atmosfärmodellen "Sub-artic summer" användes.

Tillbaka till [Aerosoler](#), [Bakgrundsstrålning](#), [Dis](#), [Dämpning](#), [Luftfuktighet](#), [Räckviddsförlust](#), [Rökplymer](#), [Spridning](#) och [Våglängd](#).

5.2 Bakgrundsstrålning

Vid användning av laserbaserade tekniker kan bakgrundsstrålning från solen påverka prestanda hos de detekterande sensorerna. I Figur 46 (a) visas solens spektrala irradians utanför jordens atmosfär, och i Figur 46 (b) visas irradiansen vid havsnivå. I figurerna visar att solljuset utanför atmosfären har ett irradiansmaximum i det synliga området (VIS) och med ett betydande bidrag ut i det infraröda området (IR). Vid en jämförelse mellan (a) och (b) ses tydligt vilken påverkan absorption och spridning har på den strålning som når jordytan. Den totala irradiansen minskar och irradiansmaximum förskjuts mot längre våglängder. I Figur 46 (b) visas den spektrala irradiansen för fyra olika vinklar mot zenit (zenit pekar rakt upp i himlen, 90° relativt horisonten). Dessa olika vinklar svarar mot olika tidpunkter på dagen där 0° är mitt på dagen i ett tropiskt område och 80° är nära (i tid) solens nedgång. Förskjutningen av spektrum mot längre våglängder nära solens nedgång relativt mitt på dagen beror på att ljuset behöver färdas en längre sträcka genom den dämpande atmosfären för att nå fram vid höga zenitvinklar än vid låga. Då korta våglängder sprids effektivare än långa mot atmosfärens gasmolekyler, enligt Rayleigh spridning, försvinner relativt sett mer av de korta våglängderna ju längre sträckan genom atmosfären är.



Figur 46: Exempel på spektral irradians från solen, dvs. infallande optisk effekt per kvadratmeter uppdelat efter våglängd. I (a) visas irradiansen utanför atmosfären, och i (b) vid havsnivå. I (b) visas fyra olika fall: inkommande strålning vid 0°, 40°, 60°, och 80° vinkel mot zenit (dvs. 90° relativt horisonten).

Effekten som solens bakgrundsstrålning har vid laserbaserade tillämpningar är en höjning av nollnivån (eller brusnivån) i den detekterande sensorn. Det vill säga den signalnivå som sensorn ger ifrån sig i frånvaro av lasersignal. En höjning av sensorns brus medför att verkliga signaler blir svårare att detektera och tolka, och räckvidden kan därför minska.

Ett sätt som kan användas för att minska påverkan från bakgrundsstrålning vid till exempel aktiv avbildning eller laserutpekning är att förse det detekterande systemet med ett snävt bandpassfilter centrerat runt laservåglängden. Ett bandpassfilter är konstruerat för att dämpa (absorbera eller reflektera) ljus utom i ett väldefinierat våglängdsintervall där transmissionen är hög. På detta sätt kan sensorbruset minskas utan att nivån på den verkliga signalen påverkas signifikant.

Tillbaka till Räckviddsförlust och Upplösning.

5.3 Diffraction

Diffraction är en fundamental egenskap för vågutbredning. Det kan definieras som böjningen av en våg (i vårt fall ljus) på grund av blockerande strukturer. Diffraction är också orsaken till att även en laserstråle i vakuum kommer att få en breddning av stråldiametern i takt med att den utbreder sig, och den begränsar hur liten tvärsnittsarea en stråle kan fokuseras till med hjälp av t.ex. linser eller speglar.

En laserstråle har vid ljuskällan en väldefinierad diameter. Denna avgränsning, det vill säga att strålen inte är oändligt bred, kan också ses som en sorts blockerande struktur, och är orsaken till att även en ideal laserstråle i vakuum kommer breddas på grund av diffraction i takt med att den utbreder sig. Vinkeln (θ) i radianer som en kollimerad stråle breddar sig med kan approximeras med

$$\theta \approx \frac{\lambda}{D}.$$

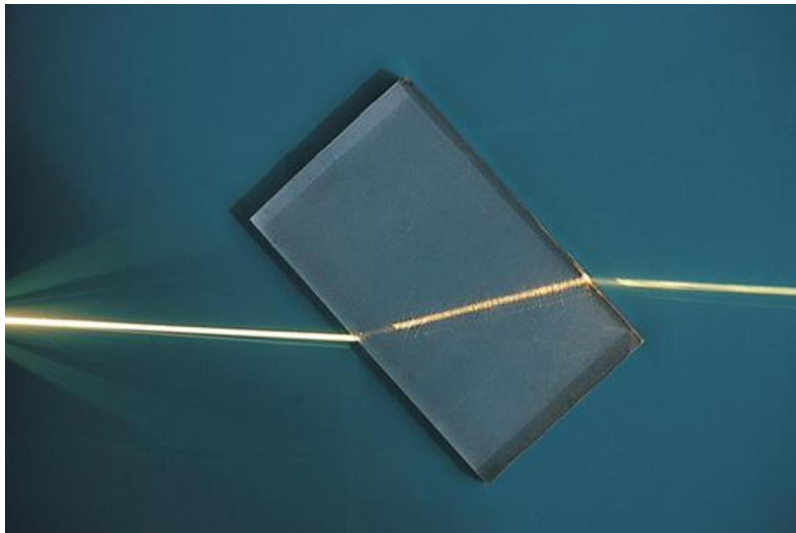
Där λ är våglängden på laserljuset, och D är strålbredden vid ljuskällan. Våglängdsberoendet innebär att en laser med synligt ljus breddar sig mindre än en laser vid IR-våglängder, och beroendet på den initiala strålbredden innebär att en laser med stor initial strålbredd divergerar mindre än en laser smal initial bredd.

Diffraction kommer alltid att finnas för tekniker baserade på elektromagnetisk strålning, och i frånvaro av andra degraderande effekter är det diffraction som styr till exempel strålbredden hos en laserstråle efter propagering långa sträckor, eller hur små objekt som kan ses i ett kamerasystem. Optiska system som är så väl designade och tillverkade att de har prestanda som enbart styrs av diffractionen och den fysiska storleken kallas diffraktionsbegränsade, de levererar den bästa prestanda som är fysikaliskt möjligt givet den storlek de har.

Tillbaka till Divergens, Scintillation, Strålbreddning och Upplösning och synfält.

5.4 Refraktion - brytningsindexvariationer

En ljusstråle som passerar områden med olika brytningsindex kommer att böjas av, ju större skillnad i brytningsindex desto mer avböjning. Detta fenomen kallas för refraktion och exempel på detta kan ses i Figur 47.



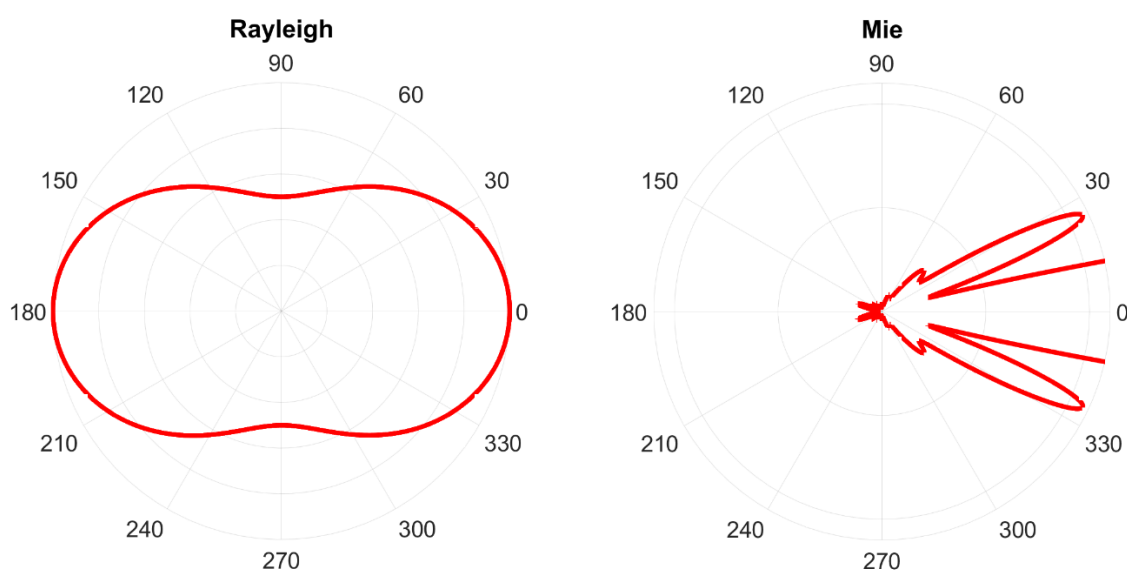
Figur 47: Exempel på refraktion. En ljusstråle böjs av när den passerar genom en plastkloss. Orsaken är att plastklossen har ett annat brytningsindex än den omgivande luften. Bild: [Allmän egendom]³⁸

I atmosfären kommer refraktion att ske på grund av variationer i tryck och temperatur i luften. Dels finns storskaliga och i tiden stabila effekter från till exempel att temperaturen varierar med höjden över marken och dels finns tidsvarierande effekter från mindre "luftpaket" med slumpmässigt varierande storlek och brytningsindex, kallat turbulens. Om luftpaketens storlek är större än laserns stråldiameter kommer laserstrålen att ändra riktning på grund av ändringarna i brytningsindex. Dessa storskaliga brytningsindexvariationer ger upphov till effekter som strålvandring. Om istället luftpaketerna är mindre än diametern kommer lokala avböjningar inom strålens tvärsnitt att ske vilket orsakar en breddning av stråldiametern, och kan "bryta" sönder den i delstrålar. Dessa delstrålar förstärker och försvagar varandra vilket ger upphov slumpvisa intensitetsvariationer i strålens tvärsnitt, så kallade scintillationer. När större sammanhängande brytningsindexskiktningar uppstår i atmosfären, till exempel inversionsskikt och ledskikt, uppstår storskaliga och i tiden stabila effekter som strålavböjning.

Tillbaka till Scintillation, Strålavböjning och Strålvandring.

5.5 Spridning

I tillägg till [absorption](#) kan ljus också spridas mot luftens gaser och [aerosoler](#). Med spridning menas att ljuset byter riktning när det träffar gasmolekylen eller aerosolen. Hur mycket av det infallande ljuset som kommer att spridas, och i vilka riktningar som spridningen sker, styrs i stor utsträckning av skillnaden mellan ljusets våglängd och gasmolekylens/aerosolens storlek. Om ljusets våglängd är mycket större än partikelns storlek (till exempel molekyler för lasrar) kallas spridningen för Rayleigh-spridning. Om ljusets våglängd är i samma storleksnivå som partikeln (till exempel sotpartiklar eller [dimma](#), dvs. små vattendroppar, för lasrar) kallas spridningen för Mie-spridning. Om våglängden är mycket mindre än partikelns storlek (till exempel [regndroppar](#) för lasrar) kallas spridningen för geometrisk spridning.



Figur 48: Illustration av Rayleigh- och Miespridning för en vattendroppe i luft, med infallande ljus från vänster i bild. I båda fallen har ljuset en våglängd på $0,65\ \mu\text{m}$ (dvs. rött ljus) och vattendroppens brytningsindex är satt till 1,33. För Rayleighspridning har en droppradie på $1\ \text{nm}$ använts, och för Miespridning gjordes beräkningen med en radie på $1\ \mu\text{m}$.

Figur 48 visar en illustration av Rayleigh- respektive Miespridning. I båda fallen kommer ljuset in från vänster, och de röda kurvorna visar den relativa intensiteten av det spridda ljuset som funktion av spridningsvinkeln. Rayleighspridning karakteriseras av en relativt diffus spridning, det vill säga ljuset sprids ungefär lika starkt i alla riktningar. Miespridning, å andra sidan, karakteriseras av att en stor del av ljuset sprids i eller nära framåtriktningen, och med avtagande sidolober. I fallet för Miespridningen i Figur 48 är framåtloben för stor för att kunna visas i sin helhet utan att sidolobernas bidrag blir i princip osynliga i jämförelse. Den totala andelen ljus som sprids mot gaser (Rayleighspridning) när en laserstråle utbreder sig igenom atmosfären tenderar att vara liten relativt den andelen ljus som sprids mot aerosoler (Miespridning). Om man är intresserad av spritt ljus i framåtriktningen kan man ofta ignorera bidraget från Rayleighspridningen.

Vid geometrisk spridning, i fallet då våglängden är mycket mindre än storleken på partikeln, sprids strålen genom brytning och refraktion i droppens yta.

Den del av ljuset som sprids tillbaka åt samma håll den kom ifrån kallas för bakåtspridning.

Tillbaka till [Aerosoler](#), [Aktiv avbildning för hotidentifiering](#), [Avståndsmätning](#), [Bakgrundsstrålning](#), [Brytningsindex](#), [Dimma](#), [Dis](#), [Dämpning](#), [Fri optisk kommunikation](#), [Laserblandning](#), [Laserkorona](#), [Laservapen](#), [Laservarnare](#), [Lidar för beslutsstöd](#), [Moln](#), [Nederbörd](#), [Optikspaning](#) och [Räckviddsförlust](#).

6. Viktiga egenskaper för lasrar och mottagarsystem

6.1 Divergens

Ljuset från många typer av lasrar kan beskrivas som gaussiska strålar. Strålmidjan kallas den position längs strålens optiska axel som har minst strålradi (se Figur 49). I takt med att avståndet från strålmidjan ökar kommer även strålradien öka, dvs. strålen divergerar. Irradiansen (I) i ett tvärsnitt med radien r efter sträckan z , ges för en gaussisk stråle av exponentialfunktionen

$$I(r, z) = I_0 \left[\frac{w_0}{w(z)} \right]^2 e^{-\frac{2r^2}{w(z)^2}}.$$

I ovanstående ekvation är I_0 irradiansen (effekt per m^2) på optiska axeln vid midjan, w_0 är strålradien i midjan, $w(z)$ är strålradien efter ett avstånd z från midjan (längs optiska axeln), och r är avståndet från optiska axeln i tvärsnittet. De två 3D-figurerna i Figur 49 visar exempel på irradiansprofiler vid olika avstånd från strålens midja.

För en kollimerad stråle (beskrivs mer utförligt längre ner) bestäms divergensen enbart av diffraktion, och strålradien vid en position z på optiska axeln kan räknas ut som

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2},$$

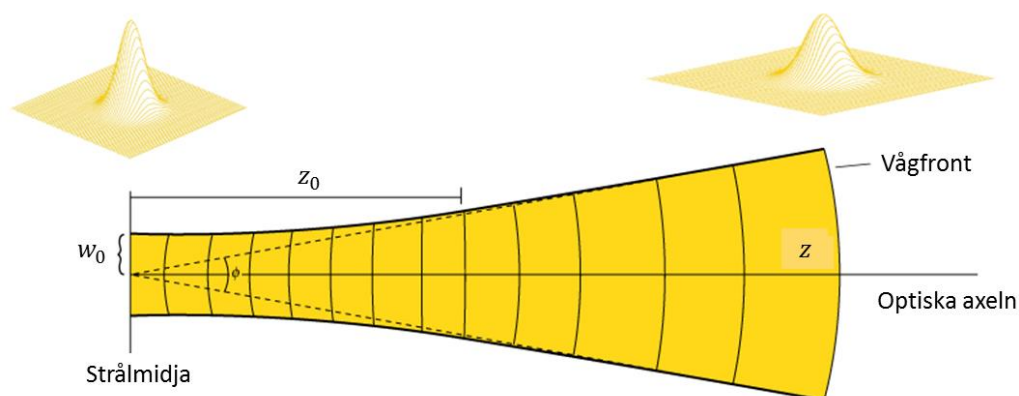
där λ är ljusets våglängd. Midjans längd längs optiska axeln definieras av Rayleighlängden (z_0) som ges av avståndet från midjans centrum till den position där strålens tvärsnittsarea har fördubblats. Rayleighlängden relaterar till strålradien i midjan enligt

$$z_0 = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}.$$

Rayleighlängden ökar om strålradien i midjan ökar, och om våglängden på ljuset minskar ökar Rayleighlängden givet att strålradien hålls konstant. Området i Rayleighzonen (innanför Rayleighlängden) kallas för laserns närfält och här approximeras ofta strålradien som konstant. På samma sätt kallas området utanför närfältet för fjärrfältet och man kan visa att långt ut i fjärrfältet (långt utanför Rayleighlängden) divergerar strålen med en vinkel

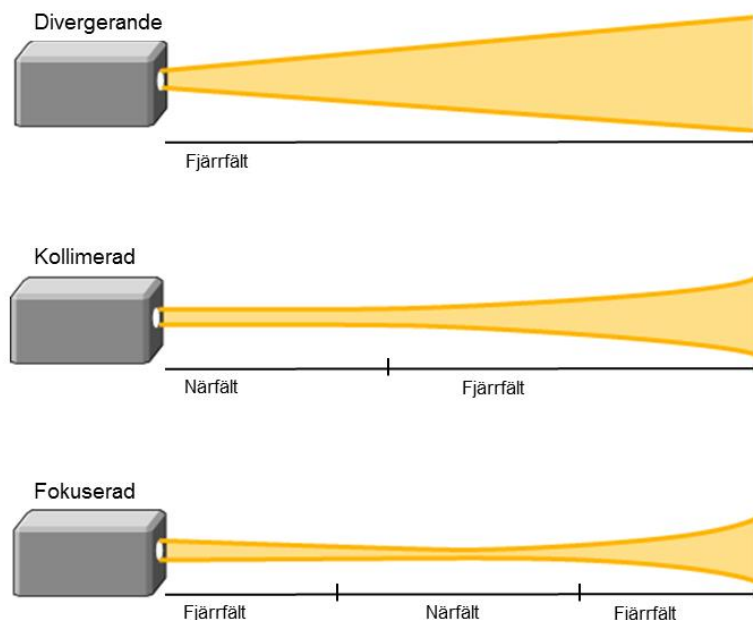
$$\Phi = \frac{2\lambda}{\pi w_0},$$

där Φ är divergensvinkeln i radianer. Ekvationen för divergensvinkeln visar att divergensen i fjärrfältet minskar med ökad radi på strålmidjan, och minskar med minskad våglängd. Parametrarna strålmidja, Rayleighlängd och divergensvinkel visas i Figur 49.



Figur 49: Exempel på utbredning av en gaussisk laserstråle. De två 3D-figurerna indikerar strålens intensitetsprofil vid midjan respektive efter utbredning ut i fjärrfältet. I bilden finns även strålmidjans radie (w_0), Rayleighlängden (z_0), och divergensvinkeln (Φ) indikerade. Notera att i enlighet med ekvation i kap 6.1 anges divergensvinkeln som hela öppningsvinkeln för strålen.

Utbredningen av en laserstråle kan delas upp i tre typfall, som visas i Figur 50, och som typiskt relaterar till hur interna optiska element som linser och speglar har placerats inuti lasern. Hos en *kollimerad* laserstråle är midjan placerad vid laserns öppning, och divergensen styrs av diffractionen i enlighet med ovanstående text. En kollimerad stråle ger den lägsta möjliga divergensen i fjärrfältet, och är ofta eftersträfvansvärd då man vill använda strålen på långa avstånd, till exempel vid laserutpekning. En *divergerande* laserstråle saknar midja (eller fokus) och den har en divergens som är större än vad som styrs av diffractionen. Divergerande strålar kan användas i ledstrålesystem eller till aktiv avbildning. En *fokuserad* laserstråle har midjan placerad framför lasern. Efter midjan kommer en fokuserad stråle divergera snabbare än en kollimerad, och syftet är att placera fokus på målet. Detta används till exempel i laservapen, där man kan kosta på sig den stora och komplexa optik som krävs för att fokusera på långa, varierande avstånd för att få maximal prestanda.



Figur 50: Utbredning av laserstråle i tre olika fall: Divergerande, kollimerad och fokuserad.

Tillbaka till Diffraction, Laserutpekning, Ledstrålesystem, Strålbreddning och Turbulens.

6.2 Pulslängd

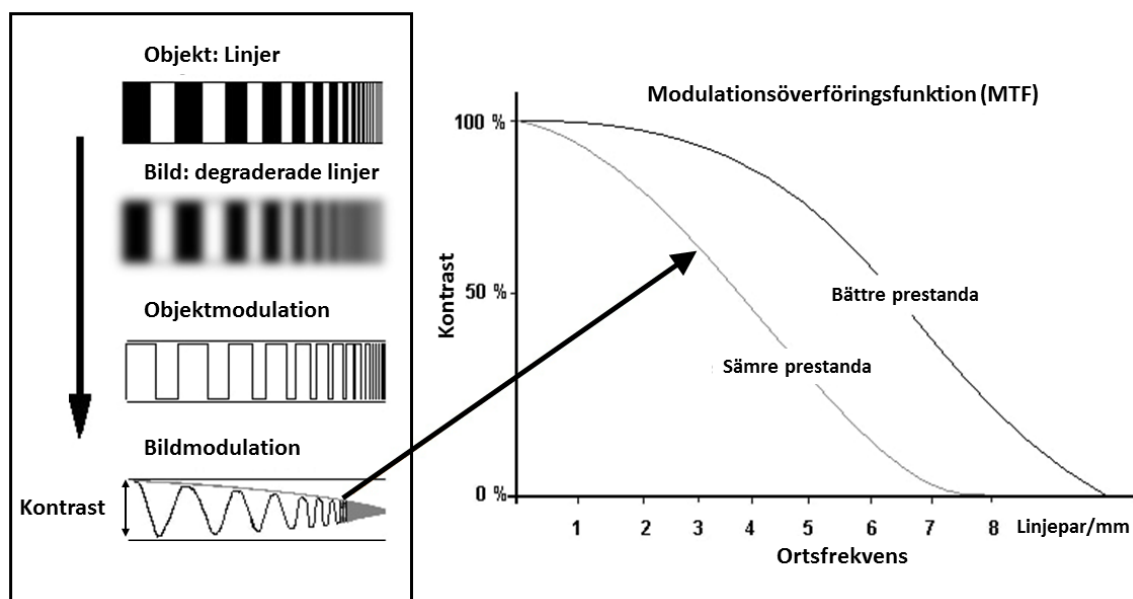
Laserstrålning genereras normalt som pulser, där pulslängden kan variera från ett fåtal femtosekunder (10^{-15} s) till många timmar beroende på tillämpning. För kortare pulser används ofta flera pulser efter varandra, antingen vid en fast frekvens eller med varierande tidsmellanrum som används för att koda in information. Vilken pulslängd som används beror på tillämpningen. När den reflekterade strålningen ska mätas vill man oftast ha så hög toppeffekt (eller momentan effekt) som möjligt och använder korta pulser. Både lasertekniken och elektroniken i mottagaren sätter gränser så att runt 10 ns är vanligt för till exempel avståndsmätning och utpekning. För andra tillämpningar, som laservapen, är det den totala mängden energi som är viktig och lasrar med pulslängder på sekunder används, där bara en puls är tänkt att behövas för att nå tillräcklig verkan. Sedan finns det tillämpningar som bländning och störning av målsökare där det är mottagaren som bestämmer hur lång tid man behöver belysa. Då används ofta lasrar som kan moduleras genom att styra strömmen till dem, alternativt lasrar med kortare pulser som skickas i grupper med hög pulsrepetitionsfrekvens inom gruppen.

Tillbaka till Kontrast- och upplösningsförlust, Laserbländning, Laservarnare och Störning av målsökare.

6.3 Upplösning och synfält

Ett elektrooptiskt kamerasystem fungerar genom att ett kameraobjektiv (ett system av linser) fokuserar infallande strålning på en sensor. Den vy som ses av sensorn definieras av två vinklar (en i höjdlid och en i sidled), och kallas kamerasystemets synfält eller FOV ("Field of view"). En pixel i sensorn "ser" den bildinformation som finns inom ett givet vinkelintervall, även kallat momentant synfält eller IFOV ("Instantaneous field of view"). Det innebär att en fundamental upplösningsbegränsning för systemet är den yta i objektet som projiceras på en pixel, objektsinformation som är mindre än detta kan inte upplösas, och denna yta varierar med avståndet till objektet. Som ett exempel kan ges ett 3D-avbildande system som för närvarande finns på FOI, som har en pixelstorlek på 50 μm och använder ett teleobjektiv med en fokallängd på 750 mm. Denna kombination ger ett momentant synfält på 0,004 grader, vilket gör att en pixel avbildar en yta på $1,3 \times 1,3 \text{ cm}^2$ på 200 m avstånd och en yta på $6,7 \times 6,7 \text{ cm}^2$ på 1000 m avstånd.

I tillägg till den upplösningsbegränsning som det momentana synfältet ger kommer också optiken (t.ex. objektivet) och atmosfären begränsa upplösningen. Både optiken och atmosfären kan till stor del beskrivas av sin modulationsöverföringsfunktion (MTF). Man delar upp MTF i olika faktorer som förenklat multipliceras till en total MTF. Bland annat påverkar diffractionen, turbulensen och aerosolerna den totala MTF funktionen. Förenklat uttryckt beskriver funktionen vilken kontrast olika stora objekt kan avbildas med, eller med ett annat synsätt, hur skarpt en ideal kant kan återskapas i bilden och MTF anges som kontrast som funktion av invers objektsstorlek, så kallad ortsfrekvens (stora objekt eller gradvisa kantövergångar svarar mot låga ortsfrekvenser och vice versa). En illustration av MTF-konceptet kan ses i Figur 51.



Figur 51: Illustration av MTF. Ett idealt objekt avbildas av ett tänkt system. MTF beskriver degraderingen av kontrast och upplösning.

Som ses i Figur 51 avtar möjligheten att generera kontrast i takt med att ortsfrekvensen ökar till dess att kontrasten är under brusnivån i bilden. Gränsen för när ett objekt har blivit för litet, eller när två närliggande kanter i objektet ligger för nära varandra, för att kunna avbildas med en kontrast skild från brusnivån definierar systemets upplösning.

Av detta följer att upplösningen vid en mätning bestäms både av systemets momentana synfält, dess förmåga att återskapa fina strukturer i objektet, och av nivån av bakgrundsbrus i bilden. Brusnivån styrs både av systemets prestanda och av bakgrundsstrålning i bilden. Detta kan förstås utifrån Figur 51, om man tänker sig en generell av höjning av lägsta signalnivå i bildmodulationen kommer både kontrasten och den högsta upplösningsbara ortsfrekvensen att minska.

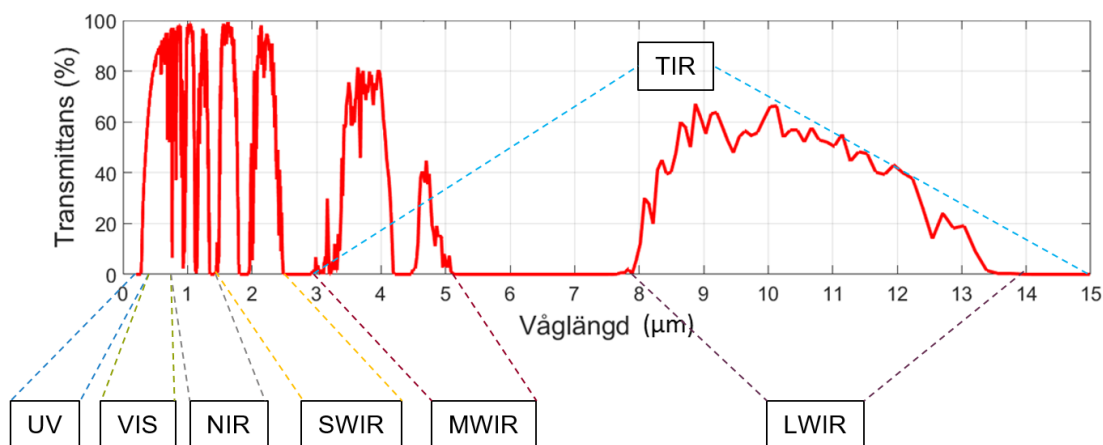
Tillbaka till Kontrast- och upplösningsförlust, Ledstrålesystem, Moln och Optikspaning.

6.4 Våglängd

Det optiska våglängdsområdet delas upp i olika delar baserat på transmissionsfönstren i atmosfären som visas i punktlistan och Figur 52:

- ultraviolett (UV) går från 0,2–0,4 μm ,
- visuellt (VIS) går från 0,4–0,7 μm ,
- när-IR – near infrared (NIR) går från 0,7–1,1 μm ,
- kortvågig-IR – short wave infrared (SWIR) går från 1,1–2,5 μm , (Men SWIR-kameror kan ha en känslighet att mäta våglängder ner till 0,4 μm)
- mellanvågs-IR – mid wave infrared (MWIR) går från 3–5 μm ,
- långvågig-IR – long wave infrared (LWIR) går från 8–14 μm och
- termisk-IR (TIR) som mäter den interna värmestrålningen från objekt sträcker sig mellan 3–15 μm .

Observera att i vissa fall kan våglängdsindelningarna för IR variera beroende på olika kameraföretag.



Figur 52: Figuren visar indelningen och benämningen på de transmissionsfönster som beskrivs i punktlistan ovan.

Lasrar finns vid de flesta våglängder, men olika lasertyper är bäst lämpade för olika våglängder och i de flesta fall är våglängden för en laser bestämd vid tillverkningen. Några exempel på vanliga lasrar är diodlasrar vid 0,8–0,9 μm och Nd:YAG lasrar vid 1,064 μm . Det är också populärt att använda lasrar vid 1,55 till 1,57 μm eftersom maximalt tillåten exponering av ögon är mycket högre här än vid kortare våglängder. Här används flera alternativ som diodlasrar, lasrar i erbium-dopat glas och icke linjär frekvenskonvertering av 1,06 μm -lasrar. I MWIR och LWIR har det länge varit svårt att bygga bra lasrar, möjligen med undantag av CO₂-lasrar vid 10,6 μm . Det senaste decenniet har dock kvantkaskadlasrar, en halvledarlasertyp med egenskaper liknande de för diodlasrar, kommit ut på marknaden och möjliggjort små kompakta system för vissa tillämpningar.

Tillbaka till [Aktivavbildning för hotidentifiering](#), [Avståndsmätning](#), [Bakgrundsstrålning](#), [Diffraction](#), [Dimma](#), [Fri optisk kommunikation](#), [Laserbländning](#), [Laserkorona](#), [Laservarnare](#), [Ledstrålesystem](#), [Luftfuktighet](#), [Moln](#), [Nederbörd](#), [Optikspaning](#), [Räckviddsförlust](#) och [Störning av målsökare](#).

Appendix A: Tabeller och förklaringar

A.1 Tabeller för partikelstorlekar

Tabell 2: Storlek och koncentration av droppar och stoft i atmosfären. ³⁹

Typ	Storlek [μm]	Koncentration [cm^{-3}]
Luftmolekyl	10^{-4}	10^{19}
Kondensationskärna	$10^{-3} - 10^{-2}$	$10^2 - 10^4$
Aerosol	$10^{-2} - 1$	$10 - 10^3$
Dimma	$1 - 10$	$10 - 10^2$
Moln	$1 - 10$	$10 - 300$
Regn	$10^2 - 10^4$	$10^{-5} - 10^{-2}$

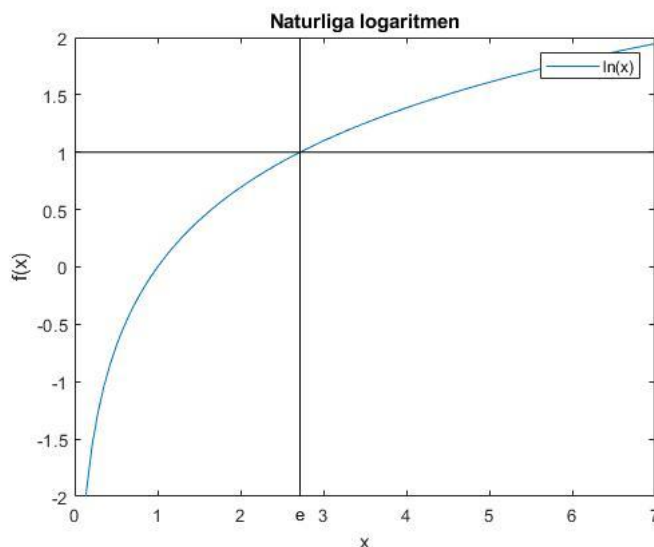
Tabell 3: Storlek och fallhastighet för olika typer av droppar i moln. ¹⁵

Typ	Storlek [μm]	Fallhastighet [$\text{m/s} \times 10^{-2}$]
Kondensationskärna	0,1	0,0001
Molndroppe	10	1
Stor molndroppe	50	27
Duggregn	200	70
Liten regndroppe	1000	400
Regndroppe	2000	650

Tillbaka till [Dimma](#), [Moln](#) och [Nederbörd](#).

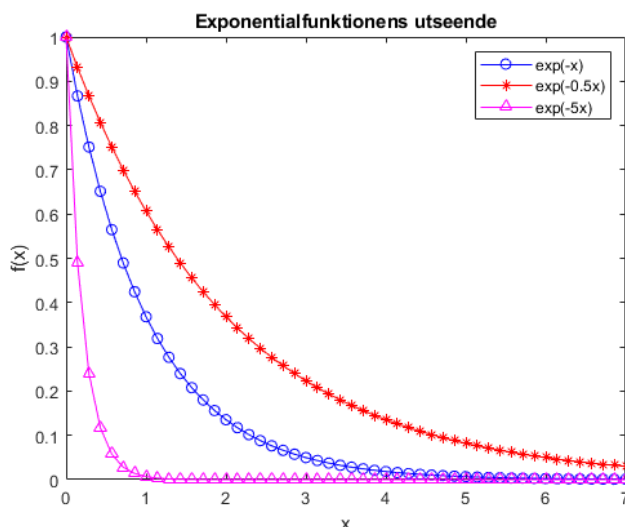
A.2 Exponentialfunktionen

En exponentialfunktion är en funktion på formen $f(x) = a^x$, där a kallas för basen och är en positiv konstant och exponenten x är variabeln. När basen är ungefär lika med talet 2,718 kallas konstanten för e , vilket ibland kallas för Eulers tal. Den naturliga logaritmen är inversen av funktionen e^x , vilket innebär att $\ln(e^1) = 1$, se Figur 53.



Figur 53: Den blå linjen är den naturliga logaritmen, $f(x) = \ln(x)$. De två svarta linjerna markerar att när $x = e$ så kommer $f(e) = \ln(e) = 1$.

Ekvationen för dämpning, den barometrisk höjdformeln och irradiansen följer den inverterade naturliga logaritmen som innebär att basen a är konstanten e och exponenten x är variabeln. Den funktionen ser ut på följande sätt $(x) = e^x$ och skrivs ibland $f(x) = \exp(x)$.⁴⁰ När exponenten är negativ ($-x$) benämns funktionen som avtagande och när exponenten är positiv (x) benämns funktionen som växande. I ekvationen för dämpning beskrivs x som avståndet och man säger att effekten avtar exponentiellt med avståndet. I Figur 54 ges några exempel på hur dämpningen kan se ut för olika extensionskoefficienter.



Figur 54: Bilden visar hur exponentialfunktionen ($\exp$) avtar med ökande värde på x (blå markering). Rödmarkeringen visar exponentialfunktionen med en mindre extensionskoefficient på 0.5, observera att dämpningen sker då långsammare. Lilamarkeringen visar exponentialfunktionen med en större extensionskoefficient på 5, observera att dämpningen då sker snabbare.

Tillbaka till Brytningsindex, Divergens och Dämpning.

Appendix B: Källor och fördjupande litteratur

- ¹ https://www.rheinmetall-defence.com/en/rheinmetall_defence/index.php Hämtad 2019-10-31.
- ² M. Henriksson, L. Sjöqvist., *Laserteknologier för telekrigstillämpningar – En översikt av teknikutvecklingen*, FOI-R--4089--SE, 2015.
- ³ Mike1979 Russia, 2012-06-28. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kornet-EM_at_Engineering_Technologies_2012_Missile_Launcher.jpg Licens: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.en> Hämtad 2019-10-14.
- ⁴ <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/hagringar-1.4193> Publicerad 2013-10-03, uppdaterad 2019-01-18. Hämtad 2019-06-10.
- ⁵ L. C. Andrews och R. L. Phillips., *Laser Beam Propagation through Random Media*. SPIE Press, 1998.
- ⁶ Gerd A. T. Mueller, 2005-08-22. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2005-08-22_fata_morgana.jpg Licens: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.en> Hämtad 2019-10-30.
- ⁷ O. Steinvall et al., *Slant path range gated imaging of static and moving targets*. Proc. SPIE 8379, 82790W, 2012.
- ⁸ Thalia Traiano, 2015-10-19. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Coronae_Atmospheric_Optics.jpg Licens: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en> Hämtad 2019-10-14.
- ⁹ H. Henriksson, O. Gustavsson och L. Sjöqvist., *Multi wavelength laser beam propagation close to a down-scaled jet engine exhaust*, FOI-R--2002-SE, 2006.
- ¹⁰ H. Moberg och Å. Wiss., *FOI orienterar om, nr 1. Elektromagnetiska vapen och skydd*, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), 2001. Sid. 17.
- ¹¹ O. Gustafsson, et al., *Slutrapport för projektet Vågutbredningsanalys för radio, radar och elektrooptiskt system*, FOI-R--0985--SE, 2003.
- ¹² B. Nilsson, *Meteorological influence on aerosol extinction in the 0.2–40 µm wavelength range*, Appl. Opt. 18, pp. 3457–3472, 1979.
- ¹³ C. Gullström., *Use of Satellite Data for Prediction of Weather Impact on EO-Systems*. LITH-IFM-A-EX--18/3575--SE, Linköpings universitet, 2018.
- ¹⁴ NASA Earth Observatory (Landsat 8 –OLI), 2014-08-04. källa: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/84155/wildfire-in-sweden>. https://sv.wikipedia.org/wiki/Fil:2014_V%C3%A4stmanland_wildfire.jpg Hämtad 2019-10-14.
- ¹⁵ <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/atmosfarens-olika-lager-1.5838> Publicerad 2013-09-21, uppdaterad 2018-08-14. Hämtad 2019-09-12.
- ¹⁶ J. Bogren, T. Gustavsson och G. Loman., *Klimatologi Meteorologi*, Studentlitteratur Lund, 1999.
- ¹⁷ J. Lindh och G. Bergström., *FOI orienterar om, nr 4. Rymden – nytta och teknik*. Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI). 2005. Sid. 43.
- ¹⁸ E. Hecht., *Optics, fourth edition*. Pearson Education, San Francisco, 2002.
- ¹⁹ <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/lufttryck-1.657> Publicerad 2013-05-14, uppdaterad 2018-11-16. Hämtad 2019-09-12.
- ²⁰ NOAA, NASA and United States Air Force. U.S., *Standard Atmosphere*. Washington, D.C., 1976.
- ²¹ SAAE ISAF UH-60. <https://blogg.forsvarsmakten.se/flygvapenbloggen/2013/06/18/forsta-avlosningen-pa-sae-isaf-uh-60-icepac-2/> Hämtad 2019-10-31.
- ²² <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/dimma-och-fuktdis-1.18016> Publicerad 2012-08-13, uppdaterad 2017-09-13. Hämtad 2019-08-21.
- ²³ Hi-Lo, 2006-01-08. <https://sv.wikipedia.org/wiki/Dis> Licens: Allmän egendom. Hämtad 2019-06-17.

-
- ²⁴ <http://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/solstralning-i-sverige-1.89984> Publicerad 2015-06-15, uppdaterad 2019-05-24. Hämtad 2019-10-31.
- ²⁵ Igors Jefimovs, 2014-01-12. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Smog_over_Almaty.jpg Licens: <https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/deed.en> Hämtad 2019-10-30.
- ²⁶ <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/luftfuktighet-1.3910> Publicerad 2013-12-11, uppdaterad 2019-01-18. Hämtad 2019-07-04.
- ²⁷ <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/moln-introduktion-1.3852> Publicerad 2013-08-20, uppdaterad 2018-11-21. Hämtad 2019-08-23.
- ²⁸ G. H. Liljequist., *Meteorologi*. Generalstabens litografiska anstalt, 1962.
- ²⁹ <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/morka-moln-1.5653> Publicerad 2013-06-26, uppdaterad 2014-04-23. Hämtad 2019-06-17.
- ³⁰ John Nyberg. <https://se.freeimages.com/photo/halo-2-1179040> Hämtad 2019-10-30.
- ³¹ Michael & Christa Richert. <https://se.freeimages.com/photo/tiny-cirrus-clouds-1338490> Hämtad 2019-10-30.
- ³² <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/nederbord-1.361> Publicerad 2013-11-22, uppdaterad 2017-06-30. Hämtad 2019-06-11.
- ³³ <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/rokmoln-mm-1.31765> Publicerad 2013-08-23, uppdaterad 2017-03-20. Hämtad 2019-10-03.
- ³⁴ <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/turbulens-byig-vind-1.6067> Publicerad 2009-08-18, uppdaterad 2015-07-21. Hämtad 2019-06-10.
- ³⁵ H. Moberg och Å. Wiss., *FOI orienterar om, nr1. Elektromagnetiska vapen och skydd*, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), 2001.
- ³⁶ <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/vind-varfor-blasar-det-1.362> Publicerad 2012-11-22, uppdaterad 2018-09-10. Hämtad 2019-05-27.
- ³⁷ <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/skalor-for-vindhastighet-1.252> Publicerad 2012-11-22, uppdaterad 2019-06-27. Hämtad 2019-06-05.
- ³⁸ ajizai, 2014-01-03. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Refraction_photo.png Licens: Allmän egendom. Hämtad 2019-10-14.
- ³⁹ F. G. Smith., *Atmospheric Propagation of Radiation*. The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1993.
- ⁴⁰ R. A. Adams., *Calculus - A complete Course, fifth edition*. Pearson Education Canada Inc., Toronto, Ontario, 2003. Kap. 3.2-3.4.

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



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00
Fax: 08-55 50 31 00

www.foi.se