



Oude Waalsdorperweg 63
Postbus 96864
2509 JG Den Haag

www.tno.nl

T 070 374 00 00

F 070 328 09 61

info-DenV@tno.nl

TNO-rapport

TNO-DV 2006 A336

Militaire toepassingen van adaptieve optiek

Datum september 2006

Auteur(s) dr. H.H.P.Th. Bekman
ing. F.J.M. van Putten
P.J. Fritz

Rubricering rapport Ongerubriceerd
Vastgesteld door drs. W. Pelt
Vastgesteld d.d. 12 augustus 2006

Titel Ongerubriceerd
Managementuittreksel Ongerubriceerd
Samenvatting Ongerubriceerd
Rapporttekst Ongerubriceerd

DISTRIBUTION STATEMENT A
Approved for Public Release
Distribution Unlimited

Exemplaarnummer **9**
Oplage 26
Aantal pagina's 35 (excl. RDP & distributielijst)

Alle rechten voorbehouden. Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht van het ministerie van Defensie werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van de opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de 'Modelvoorwaarden voor Onderzoeks- en Ontwikkelingsopdrachten' (MVDT 1997) tussen de minister van Defensie en TNO indien deze op de opdracht van toepassing zijn verklaard dan wel de betreffende ter zake tussen partijen gesloten overeenkomst.

© 2006 TNO

AQ F07-05-0444

Militaire toepassingen van adaptieve optiek

Mogelijkheden en onmogelijkheden van adaptieve optiek voor de verbetering van optische waarnemiddelen en van laserbundelsturing voor bijvoorbeeld infrarood tegenmaatregelen (DIRCM).



Probleemstelling

Adaptieve optiek wordt gebruikt in de astronomie om onscherpte ten gevolge van atmosferische turbulenties te onderdrukken. Voor waarnemingen op lange afstand worden de beelden ook verstoord door atmosferische turbulenties. De vraag is of dezelfde technologie ook gebruikt kan worden voor het verbeteren van optische waarnemiddelen. Een andere vraag is of deze technologie laser-DIRCM-systemen kan verbeteren. In dit doelsubsidieproject dat loopt binnen het programma EO-, IR- & UV-sensorsystemen (V054) bekijkt TNO Defensie en Veiligheid de mogelijkheden en onmogelijkheden van adaptieve optiek voor genoemde applicaties. Het werk vindt plaats in samenwerking met andere WEAG-landen

(Engeland, Duitsland, Frankrijk, Italië, Zweden).

Beschrijving van de werkzaamheden

De werkzaamheden gedaan in het kader van het WEAG-project JP8.10 Precision Laser Beam Steering zijn gerapporteerd in TNO-rapport FEL-04-A102. In de huidige rapportage zijn theoretische afschattingen gemaakt voor welke optieken en voor welke afstanden adaptieve optiek zinvol is. In JP8.10 is al gekeken naar de mogelijkheid van adaptieve optiek om een verhoging van de concentratie laserlicht op de zoekkop te krijgen. Mogelijk kan adaptieve optiek ook voorkomen dat een geoptimaliseerd jam-patroon verminkt wordt door de turbulenties. In een

experiment is allereerst gekeken naar de invloed van atmosferische turbulentie op vermindering van jam-modulatiepatronen.

Resultaten en conclusies

Het is gebleken dat adaptieve optiek voor gangbare optieken slechts een zeer klein deel van het gezichtsveld kan verbeteren. Wil men over het hele beeldveld een verbetering zien dan kan dit alleen maar voor optieken met een zeer grote brandpuntsafstand en/of voor optieken die buitengewoon lichtsterk zijn. Uit metingen door een warme luchtkolom heen is geconstateerd dat een 1 kHz-modulatiepatroon extreem verstoord kan worden. Het gemiddeld ontvangen vermogen neemt af met een factor 5-6, terwijl tegelijkertijd de standaarddeviatie met een factor 15 toeneemt.

Toepasbaarheid

De resultaten zijn van belang voor herkenning op lange afstand met elektro-optische systemen die extreem grote of krachtige optieken gebruiken. Het is de verwachting dat dergelijke systemen in de toekomst gebruikt gaan worden en dat de hinder die deze systemen dan ondervinden van atmosferische turbulentie verminderd kan worden door gebruik van adaptieve optiek. Voor DIRCM-systemen is in het experiment aangetoond dat jam-patronen in sterke turbulente stromen (denk aan de uitlaat van een vliegtuigmotor) sterk

worden vervormd waardoor de effectiviteit van een jam-patroon sterk kan afnemen. Hierdoor kan de tijd die nodig is om een break-lock te bereiken toenemen of kan een

break-lock zelfs achterwege blijven. Van deze invloed dient men zich bij een operationele inzet van DIRCM rekenschap te geven.

PROGRAMMA

Programmabegeleider
drs. W. Pelt
DMO/DWS&B/RZS/OB&I

Programmaleider
dr. P.B.W. Schwering
BU1 Elektro-Optiek

Programmatitel
EO, IR & UV Sensorsystemen

Programmanummer
V054

Programmaplanning
Start 1 januari 2000
Gereed 31 maart 2006

Frequentie van overleg
Met de programma/project-begeleider werd geregeld gesproken over de invulling en de voortgang van het onderzoek.

PROJECT

Projectbegeleider
drs. W. Pelt
DMO/DWS&B/RZS/OB&I

Projectleider
dr. H.H.P.Th. Bekman
BU1 Elektro-Optiek

Projecttitel
Components for optical phase front manipulation

Projectnummer
015.31313

Projectplanning
Start 1 januari 2001
Gereed 31 december 2005

Projectteam
ing. F.J.M. van Putten,
P.J. Fritz,
dr. H.H.P.Th. Bekman

Contact en rapportinformatie

Oude Waalsdorperweg 63
Postbus 96864
2509 JG Den Haag

T 070 374 00 00
F 070 328 09 61

info-DenV@tno.nl

TNO-rapportnummer
TNO-DV 2006 A336

Opdrachtnummer
A01KM769

Datum
september 2006

Auteur(s)
dr. H.H.P.Th. Bekman
ing. F.J.M. van Putten
P.J. Fritz

Rubricering rapport
Ongerubriceerd

Samenvatting

In dit doelsubsidie project is gekeken naar de militaire relevantie van adaptieve optiek. Adaptieve optiek kan relevant zijn voor elektro-optische waarnemiddelen en voor lasersystemen zoals die gebruikt worden in bijvoorbeeld DIRCM (Directed Infrared Counter Measure) systemen.

In WEAG verband is onderzoek gedaan in het project JP8.11 Precision Laser Beam Steering naar beide toepassingen, hierover is gerapporteerd in TNO-rapport FEL-04-A102. In voorbereiding op het vervolg ERG108.019 zijn voor de twee geïdentificeerde applicaties een aantal aspecten nader bekeken.

De eerste vraag is voor welke optieken, voor welke camerasystemen, adaptieve optiek werkelijk meerwaarde heeft. Dit hebben we d.m.v. theoretische beschouwingen uitgezocht.

Het andere aspect waarover we rapporteren is in hoeverre (atmosferische) turbulenties invloed kunnen hebben op jam-modulatie patronen die een DIRCM laser uitzendt naar een inkomende infrarood geleid projectiel.

Inhoudsopgave

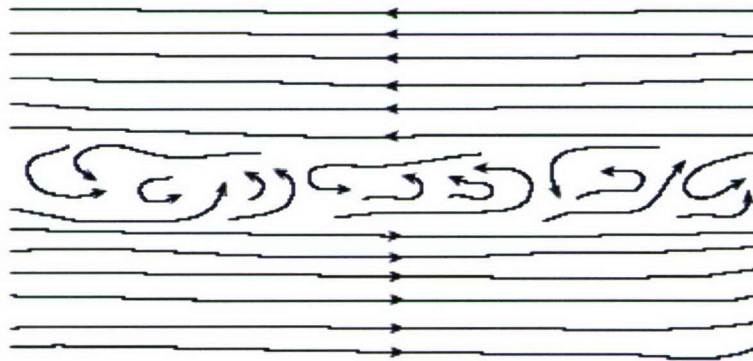
	Managementuittreksel	2
	Samenvatting.....	4
1	Inleiding.....	6
2	Adaptieve optiek voor camera systemen	12
2.1	Iso-planatic angle.....	12
2.2	Fried parameter.....	13
2.3	Systeemaspecten	14
3	Adaptieve optiek voor DIRCM	19
3.1	Invloed atmosferische turbulenties op jam patronen.....	19
3.2	Invloed hete luchtstroom.....	25
4	Conclusies.....	33
4.1	Adaptieve optiek voor camera-systemen.....	33
4.2	Adaptieve optiek voor DIRCM systemen.....	33
5	Referenties.....	34
6	Ondertekening	35

1 Inleiding

Telescopen worden op aarde op hoge bergen geplaatst in gebieden met helder weer. Desondanks worden de astronomische waarnemingen verstoord door de aardse atmosfeer die zich tussen het object en de telescoop bevindt.

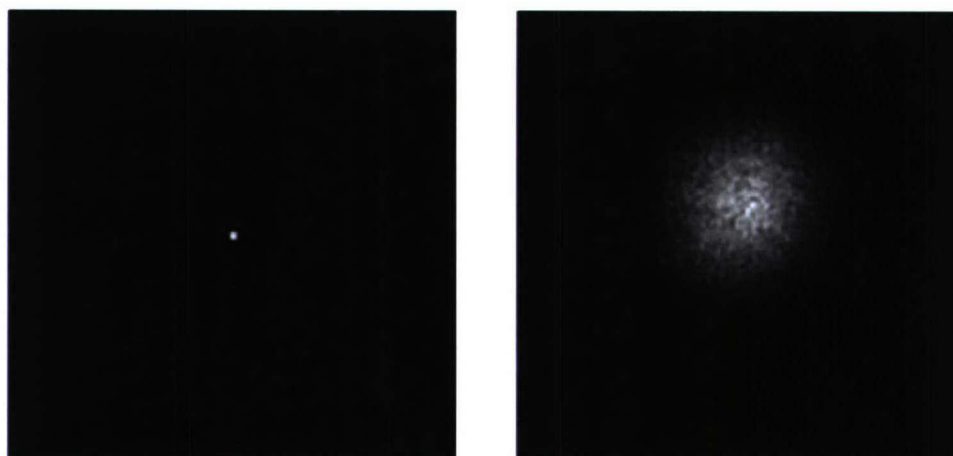
De aardse atmosfeer heeft een gelaagde structuur (zie figuur 1.1).

Wind kan in verschillende richtingen waaien in ieder van die lagen. Op het grensvlak van twee lagen waartussen een groot snelheidsverschil aanwezig is worden turbulente overgangsgebieden gevormd. Omdat de lagen bovendien nog verschillende temperaturen en dichtheden hebben (en daardoor een verschillende optische brekingsindex) gedraagt deze turbulente menglaag zich als een verzameling van random gedistribueerde lenzen dat het licht dat er door heen gaat breekt en verstrooit.



Figuur 1.1 Windsnelheden in een gelaagde atmosfeer.

Een vlakke lichtgolf die afkomstig is van een ster die heel ver weg staat zal na passage van deze turbulente menglaag over het golffront als functie van tijd en plaats variëren in amplitude en fase. Het gevolg van de intensiteitsfluctuaties is het bekende fonkelen van de sterren. Het gevolg van de fase variatie over het golffront is dat er geen scherpe afbeelding meer gemaakt kan worden van de ster, maar dat een uitgesmeerde spot ontstaat (zie figuur 1.2). De resolutie van de opnamen wordt bij aardse waarnemingen daardoor bepaald door de atmosfeer en niet door de diffractie begrenzing van de telescoop.



Figuur 1.2 (Links) diffractie gelimiteerde spot van een 8 meter telescoop; (rechts) tijdsgeïntegreerde opname van een puntbron die door atmosferische turbulenties is uitgesmeerd.

Er zijn mogelijkheden om te compenseren voor de verstoringen die door de aardse atmosfeer worden veroorzaakt. Deze technieken staan te boek onder de naam adaptieve optiek. Het principe is simpel (figuur 1.3). Men meet de vorm van het fasefront van een puntbron door fasefront detectoren (zie figuur 1.4) en door middel van een vervormbare spiegel compenseert men de afwijkingen t.o.v. van een vlak golffront (optische fase front manipulatie). Voor deze puntbron kan men gebruik maken van een heldere ster in de buurt van de objecten die men wil waarnemen. Een andere methode maakt gebruik van de een zelf gecreëerde ster in de bovenste luchtlagen. Dit doet men met een laser die in hoge luchtlagen sterk wordt geabsorbeerd. De emissie van de aangeslagen luchtmoleculen hoog in atmosfeer vormt dan de kunstmatige puntbron die men nodig heeft (de zogenaamde 'guide star'). Een adaptief optiek systeem bestaat dus uit een paar essentiële onderdelen: een golffrontsensor, een vervormbare spiegel en een controle- en regellus.

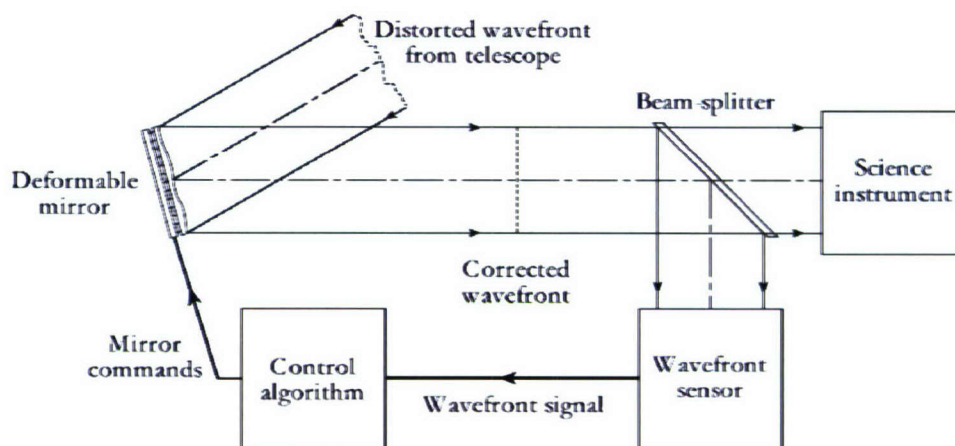
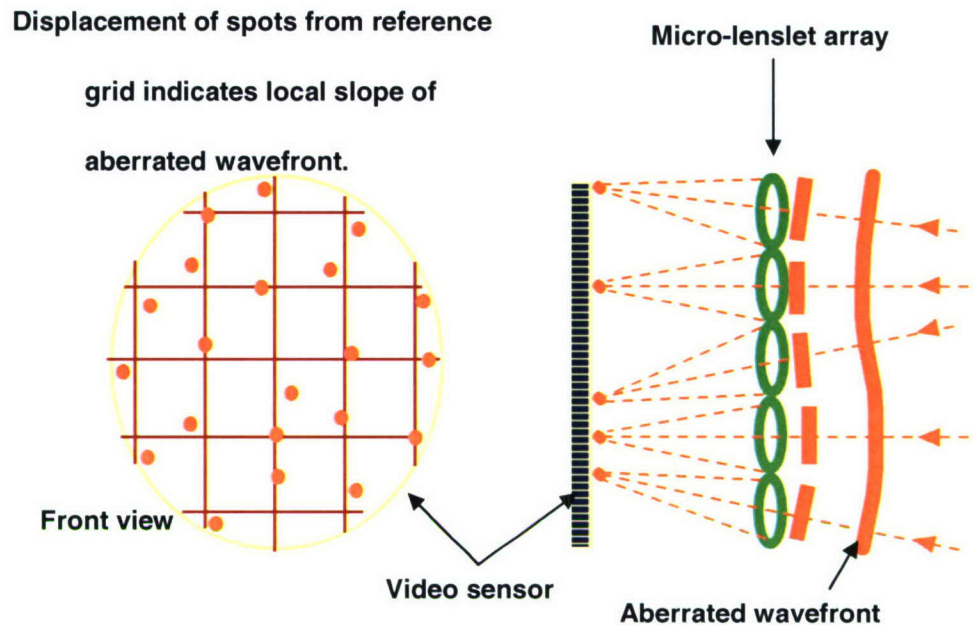


Figure 1.3 Blokschema van optisch systeem uitgerust met adaptief optisch.

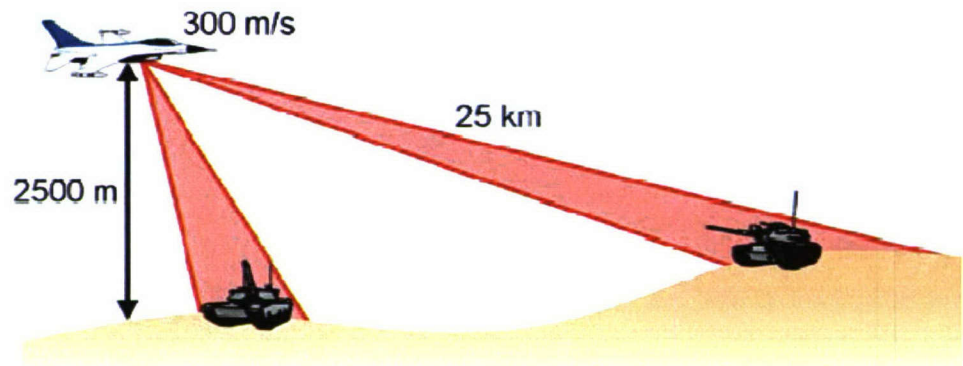
In het project 'Components for optical phase front manipulation' is geparticipeerd in een WEAG onderzoeksgroep 'JP8.11 Laser Beam Steering'. Het doel van deze groep was om te achterhalen hoe adaptieve optiek gebruikt kan worden voor een tweetal militaire toepassingen. De eerste toepassing is gerelateerd aan een DIRCM ('Directed InfraRed Counter Measure') systeem. De tweede toepassing is waarneming op grote afstand met infrarood sensoren en actieve laser sensoren.



Figuur 1.4 Golffront sensor.

1.1.1 Long range imaging

Een mogelijke toepassing van adaptieve optiek is waarneming op grote afstanden (zie figuur 1.5). Als er op grote afstand en met hoge resolutie waarnemingen gedaan moeten worden om doelen te identificeren dan ondervindt men onder bepaalde weersomstandigheden veel hinder van atmosferische turbulenties. In de WEAG studie is bekeken in hoeverre adaptieve optiek technieken ook hier hun waarde zouden hebben.



Figuur 1.5 Waarneming op lange afstand voor doelidentificatie wordt een steeds belangrijker taak.

De vraag resteert voor welke EO camera systemen adaptieve optiek echt meerwaarde heeft en hoe groot de correcties van het adaptieve optiek systeem nu werkelijk zijn.

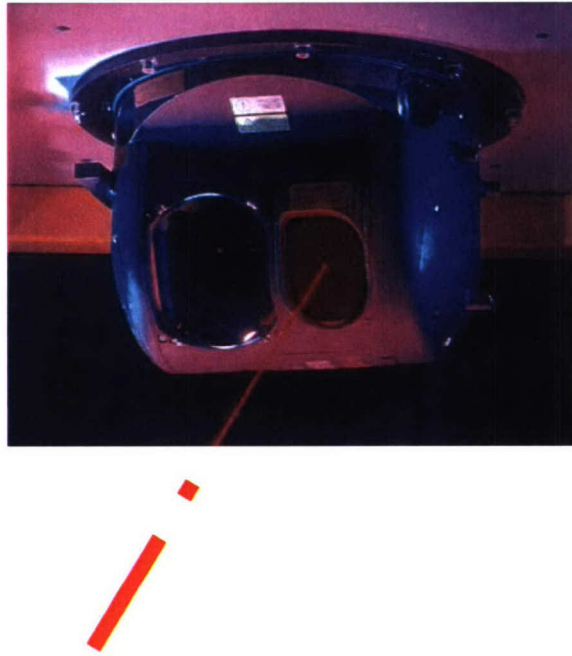
1.1.2 DIRCM

De dreiging van warmtegeleide schoudergelanceerde raketten tegen (laag) vliegende platformen is groot (zie figuur 1.6). Tevens kunnen terroristische groepen gemakkelijk in het bezit komen van deze raketsystemen. Er zijn een aantal mogelijke tegenmaatregelen die getroffen kunnen worden. Eén daarvan is de inzet van zogenaamde directed infrared countermeasure (DIRCM) systemen.



Figuur 1.6 Lancering van infrarood geleide raket.

Een DIRCM systeem (zie figuur 1.7) is een actief systeem dat gebruik maakt van lampen, of in de modernere versies, van lasers. Het voordeel van het gebruik van een laser is dat meer vermogen in de richting van de seeker kan worden gestuurd waardoor een hogere 'jam to target' rato kan worden bereikt en er dus een betere bescherming van het platform is. Het systeem wordt daardoor wel veel complexer dan een lamp gebaseerd systeem dat zijn IR vermogen gelijk over alle richtingen verdeelt. In een DIRCM systeem moet een MAWS (Missile Approach Warning Systeem) het gelanceerde missile detecteren en een richting bepalen. Vervolgens moet de DIRCM pod die kant op worden gericht en het missile moet met een snelle (400 Hz framerate) IR camera worden opgepikt. Uit analyse van de beelden volgt een nauwkeurigere positiebepaling en wordt de DIRCM laser nauwkeuriger op de seeker van het missile gericht (rekening houdend met het feit dat de IR camera de uitlaatpluim van het missile ziet en de seeker aan de voorkant van het missile zit). Het jammen van het missile kan nu beginnen. Eventueel kan de retro-reflectie die van de seeker afkomt na aanstraling met de laser worden benut om enerzijds nog een fijnere uitrichting te krijgen van de laser, anderzijds kan aan de hand van de retro reflectie signalen gepoogd worden het type missile te herkennen en daarop de uit te zenden jam code aan te passen.



figuur 1.7 Nemesis DIRCM pod.

Om zoveel mogelijk laserlicht op de seeker te krijgen is het essentieel dat de laserbundel zo ongestoord mogelijk bij de seeker aankomt, alleen dan wordt het laserlicht maximaal gefocusseerd. Ten gevolge van atmosferische turbulenties, maar nog belangrijker turbulenties veroorzaakt door het vliegtuig zelf in de vorm van aero-optische effecten en uitlaatpluim turbulenties (zie figuur 1.8) zal de laser vooral in bepaalde richtingen enorm verstoord worden. Dit betekent dat het systeem in bepaalde richtingen niet effectief is en het platform derhalve kwetsbaar. In het WEAG project JP8.11 is gekeken in hoeverre adaptieve optiek in staat is om de turbulenties veroorzaakt door de atmosfeer en het vliegtuig te compenseren. Aan de WEAG studie werd deelgenomen door Verenigd Koninkrijk (Lead nation), Frankrijk, Italië, Zweden, Duitsland en Nederland.

Een eerste theoretische afchatting is gemaakt van de grootte orde van de effecten. De atmosferische turbulenties blijken de geringste bijdrage te leveren. De turbulenties in de pluim kunnen enorm zijn en het is onwaarschijnlijk dat de huidige adaptieve optiek systemen in staat zijn alle turbulenties van de uitlaatpluim te compenseren.



Figuur 1.8 Turbulentie veroorzaakt door de uitlaatpluim van een straaljager.

De vraag is hoe dicht in de buurt van de pluim deze adaptieve optiek systemen nog effectief de turbulenties kunnen compenseren. Aero-optische turbulenties lijken in te zitten tussen die van de atmosfeer en de uitlaatpluim. De beschikbare formules voor de beschrijving van de turbulentie-effecten blijken niet allemaal consistent te zijn. In het vervolg van JP8.11 (ERG108.019) zal daarom waarschijnlijk een veldproef worden ondernomen waarin de verstoringen van een uitlaatpluim in een motorproefopstelling op verschillende laserbundels zal worden onderzocht. De aero-optische verstoringen probeert men via windtunnel proeven beter te karakteriseren dan dat op dit moment met de beschikbare theorie mogelijk is.

Een ander interessant aspect is de mate waarin de turbulentie effecten het jam patroon kunnen verstoren. Ten gevolge van de turbulenties kunnen bepaalde pulsen verdwijnen of extra pulsen ten gevolge van scintillatie effecten kunnen worden geproduceerd. Een idee zal moeten worden gevormd hoe groot deze effecten zijn. Op dit moment zijn er eerste metingen gedaan in de optische gang bij TNO om te kijken naar de invloed van kunstmatig gegenereerde turbulenties geproduceerd met een warmtekanon. Deze proeven zullen worden uitgebreid door te kijken naar passages van de laserbundel door een uitlaatpluim van een echte motor (dit laatste zal bestudeerd worden in WEAG/EDA verband).

2 Adaptieve optiek voor camera systemen

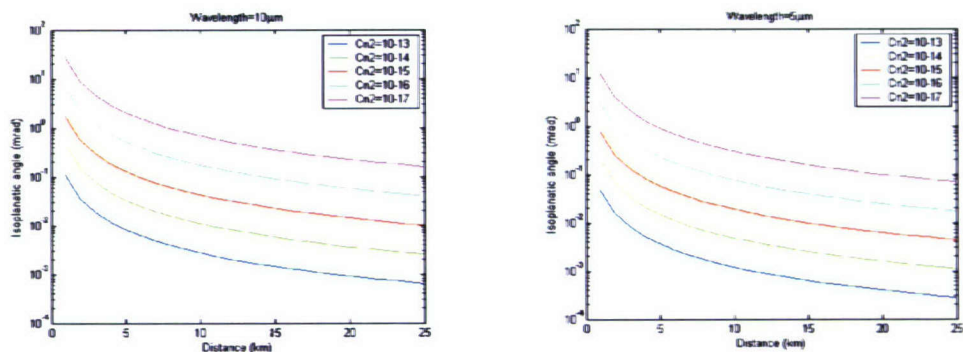
Er zijn een aantal randvoorwaarden van belang als we willen bepalen welke verbetering adaptieve optiek kan geven aan een EO systeem. De ene randvoorwaarde houdt verband met de zogenaamde 'iso-planatic angle' en de andere randvoorwaarde houdt verband met de zogenaamde Fried parameter.

2.1 Iso-planatic angle

Een complicatie die optreedt als een groter gezichtsveld in zijn geheel gecorrigeerd moet worden is dat de atmosfeer niet in alle richtingen hetzelfde is. Als met een referentiebron de verstoring van het golffront in één specifieke richting wordt gemeten, dan is deze meting alleen geldig in een klein gebiedje rondom de gebruikte referentiebron. Dit staat in de Engelstalige literatuur bekend onder de naam 'iso-planatism'. En het gebied rondom de referentiebron waarbinnen de atmosferische verstoring identiek is heet de 'iso-planatic patch'. Deze isoplanatic patch kan berekend worden met de volgende formule (referentie [1]):

$$\theta \approx \frac{(C_n^2 L k^2)^{-3/5}}{L}$$

Waarbij θ de hoekmaat is voor de isoplanatic patch, C_n^2 een maat is voor de turbulentiegraad van de atmosfeer, L is de padlengte en k is het golfgetal. Bovenstaande formule geldt alleen voor zwakke turbulentie waar de Rytov benadering geldig is. Voor lange atmosferische paden en/of hoge C_n^2 gaat de Rytov benadering niet meer op en zijn er niet zulke simpele formules meer af te leiden. Het is daarom de vraag in hoeverre de sommetjes die in het vervolg gedaan worden geldigheid hebben omdat in een aantal gevallen we niet meer kunnen spreken van zwakke turbulentie.



Figuur 2.1 Isoplanatic angle als functie van afstand en als functie van golflengte met de turbulentiegraad als parameter.

Voor een typisch Infrarood EO sensorsysteem is het gezichtsveld van een enkele pixel in de orde van 0.1-1 mrad. In figuur 2.1 is te zien dat voor de meeste afstanden en turbulentie niveaus de isoplanatic angle kleiner is dan 1 mrad. Dit betekent dus dat je met adaptieve optiek technieken alleen een gebiedjes zou kunnen corrigeren ter grootte van een enkele pixel. Voor een standaard EO systeem heeft adaptieve optiek dan dus weinig meerwaarde.

Gaat men de IFOV verlagen naar nog kleinere waarden (zoals bijvoorbeeld in het Franse DIOPTRI systeem) van zeg 10 μrad dan is de grootte van de isoplanatic patch voor een afstand van 10 km en voor een C_n^2 van $10^{-16} \text{ cm}^{-2/3}$ ongeveer 0.3 mrad (golflengte 10 μm), zie figuur 2.1. In die situatie kunnen ca. 30x30 pixels door adaptieve optiek worden aangescherpt. Voor een IFOV van 10 μrad en een typische pixel grootte van 30 μm moet dan wel een lens met een brandpuntsafstand van 3000 mm worden gebruikt. Dit soort lenzen wordt erg kostbaar en een technologische uitdaging om te maken.

Voor korte afstand ligt de zaak iets gunstiger zoals te zien is in figuur 2.1. Voor een afstand van 1 à 2 km, is de isoplanatic patch ca. 0.1 tot 10 mrad.

2.2 Fried parameter

De Fried seeing parameter geeft de grootte van de optische apertuur aan waarvoor de coherente eigenschappen van een bron behouden blijven na passage door de atmosfeer. Als de optische apertuur groter wordt komen er steeds meer incoherente bijdragen bij doordat lichtgolven door andere delen van de atmosfeer zijn gegaan.

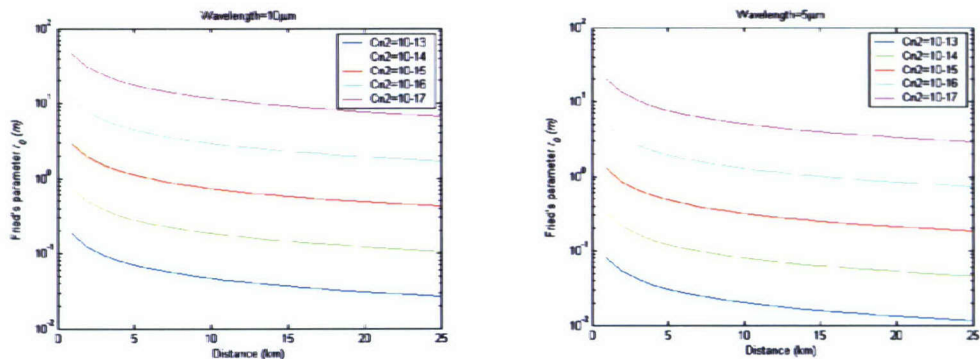
Adaptieve optiek kan atmosferische onscherpte alleen corrigeren als de optische apertuur groter is dan de Fried parameter r_0 . Fried's parameter wordt gegeven door:

$$r_0 \approx 1.68 \left(C_n^2 L k^2 \right)^{-3/5}$$

Als de apertuur (D) kleiner zou zijn dan r_0 , dan heeft men geen last van turbulentie geïnduceerde beeldonscherpte en valt er dus niets te corrigeren. Het heeft dan geen zin om adaptieve optische technieken te gebruiken.

Tabel 2.1 Invloed van apertuur afmeting op beeldeffecten ten gevolge van atmosferische turbulentie.

$D < r_0$	Coherente eigenschappen van bron bewaard Scintillatie effecten waarneembaar Geen beeld onscherpte door atmosferische turbulentie
$D > r_0$	Coherente eigenschappen van bron gaan door een middeling in de apertuur verloren Geen of verminderde scintillatie Beeld onscherpte door atmosferische turbulentie Bewegingen van het beeld door atmosferische turbulentie



Figuur 2.2 Fried parameter als functie van afstand (1-25 km) en turbulentiegraad.

We zien in figuur 2.2 dat bij een lage turbulentiegraad van de atmosfeer de Fried parameter enkele tot tientallen meters bedraagt. De optische apertuur zal voor kleine infrarood waarneemmiddelen typisch 5-10 cm zijn en voor echt grote infrarood waarneemmiddelen typisch 30-50 cm. Dus voor een C_n^2 kleiner dan $10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ zul je voor de meeste optische infrarood waarneemmiddelen weinig last hebben van turbulentie, omdat de Fried parameter dan vele malen groter is dan de optische apertuur.

2.3 Systeemaspecten

Voor welke optieken heeft het nu zin om adaptieve optiek te gebruiken?

Voor welke systemen kunnen we een meerwaarde van adaptieve optiek verwachten?

Rekening houdend met de 'isoplanatic patch' en de Fried parameter maken we nu de volgende aannames voor het optische systeem:

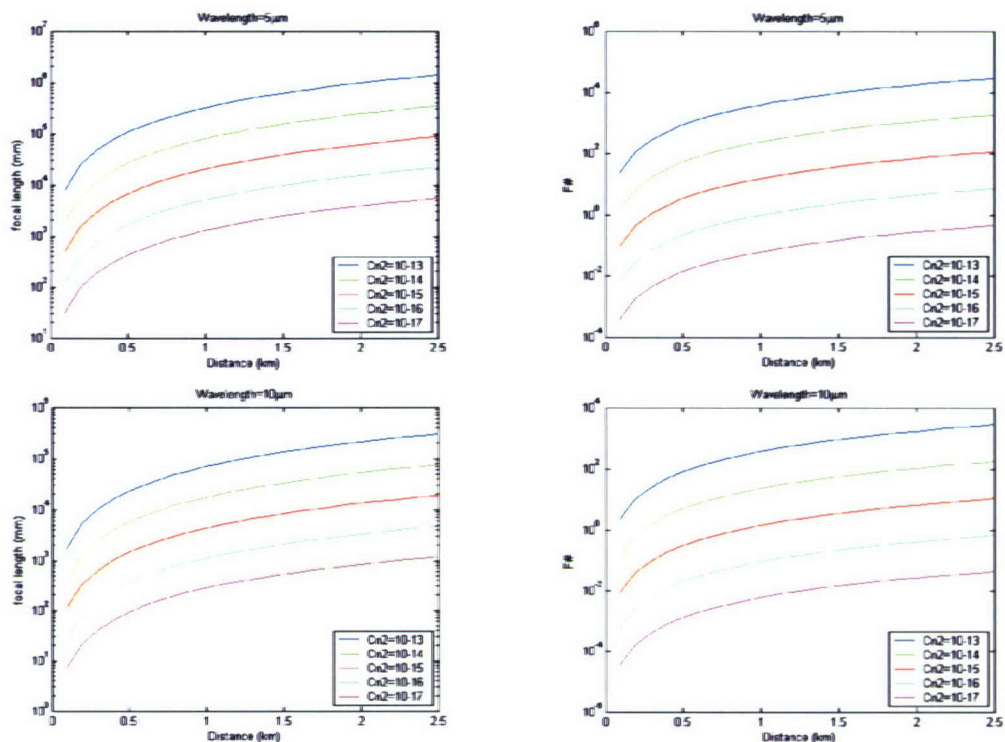
- 1 Het gezichtsveld maken we gelijk aan de grootte van een 'isoplanatic patch', zodat we het hele gezichtsveld kunnen corrigeren met een enkele fase front meting.
- 2 Fried's parameter r_0 maken we gelijk aan de optische apertuur.
Dit is een ondergrens maar anders wordt de optische apertuur erg groot.
- 3 We nemen voor het 3-5 micron een detector array van 512x512 pixels met een pixel periode van 30 micron. Dit resulteert in een array grootte van 15.36 mm.
- 4 Voor het 8-12 micron gebied nemen we een detector array van 256x256 ook met een pixel periode van 30 micron. Dit resulteert in een array grootte van 7.68 mm.

Met deze aannames berekenen we nu de brandpuntsafstand van de optiek en het F-getal met de volgende twee formules:

$$f = \frac{\text{Afmeting detector}}{\text{Field of view}} = \frac{15.36 \text{ of } 7.68}{\text{isoplanatic patch}} = \frac{15.36 \text{ of } 7.68}{\theta} [\text{mm}]$$

en

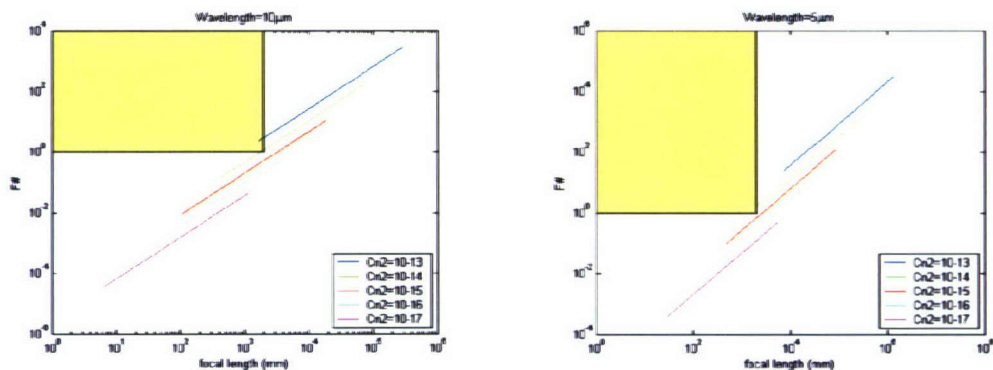
$$F\# = \frac{f}{D} = \frac{f}{r_0} = \frac{15.36 \text{ of } 7.68}{\theta r_0}$$



Figuur 2.3 Brandpuntsafstand (f) en F-getal ($F\# = f/D$) van het infrarood waarneemmiddel als we aannemen dat het gezichtsveld even groot is als een isoplanatic patch en voor een focal plane array van 15.36 mm (5 μ m) en 7.68 mm (10 μ m).

We zien in figuur 2.3 dat hoe sterker de turbulentie en hoe groter de afstand, des te kleiner de 'isoplanatic patch' en dus des te groter de brandpuntsafstand. We zien dat de brandpuntsafstand voor een middelmatige tot sterke turbulentie al snel groter is dan 1 meter. Tegelijkertijd zien we dat voor een sterkere turbulentie en een grotere afstand het F-getal toeneemt.

Voor een praktisch lenzensysteem kun je aannemen dat de brandpuntsafstand kleiner is dan 2000 mm en dat het F-getal groter is dan één. Door combinatie van de grafieken in figuur 2.3 kunnen we nu het F-getal plotten tegen de brandpuntsafstand f . In deze grafieken kunnen we de gebieden aangeven waarbinnen gangbare lenssystemen voorkomen (zie figuur 2.4).



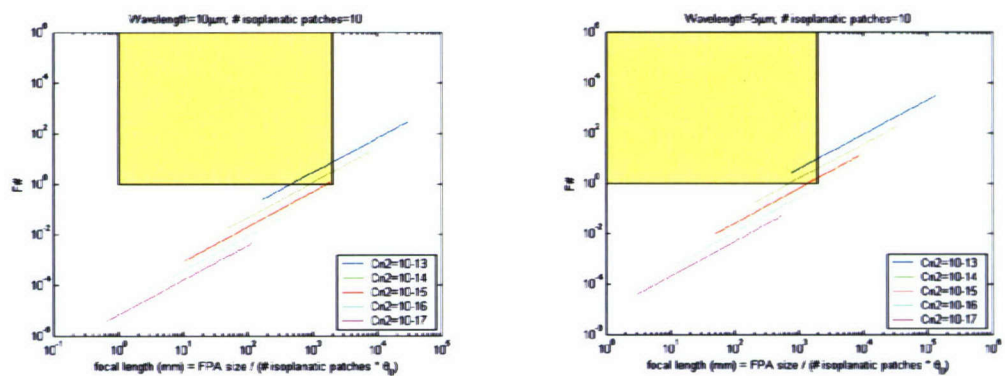
Figuur 2.4 Brandpuntsafstand (f) versus F-getal ($F\#$). Het gebied met realistische lenssystemen is met geel gearceerd. Afstand L is varieerd van 0.1 tot 2.5 km.

De rechte lijnen in de loglog grafiek zijn simpel verklaarbaar doordat geldt:

$$f \propto L^{8/5} \\ F\# \propto L^{11/5} \Rightarrow \ln(f) \propto \frac{11}{8} \ln(F\#)$$

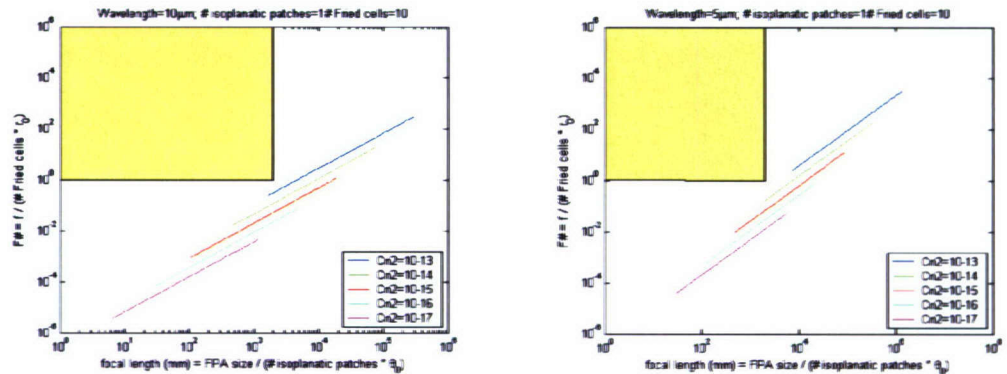
In de figuur is te zien dat adaptieve optiek eigenlijk beperkte meerwaarde heeft gegeven de randcondities en aannames. Of anders geformuleerd de huidige systemen zijn door turbulentie beperkt, als we echter meer resolutie willen (zeg 10 μ rad) dan waar we in de aannames vanuit zijn gegaan dan zijn er voordelen te behalen met adaptieve optiek.

Om de invloed van de randcondities inzichtelijk te maken variëren we nu allereerst het aantal isoplanatic patches dat binnen het gezichtsveld mag vallen. We stellen nu als eis dat er 10x10 patches binnen het gezichtsveld vallen. Het resultaat is te zien in figuur 2.4. Te zien is dat er nu meer mogelijkheden zijn om adaptieve technieken toe te passen, alleen moet daarbij opgemerkt worden dat je dan maar 1 van de isoplanatic patches kan aanscherpen. De andere 99 blijven dan onscherp, omdat die de scène door een ander deel van de atmosfeer waarnemen. Als daarentegen gebruik kan worden gemaakt van multi-conjugate adaptieve optiek, kunnen meerdere patches kunnen worden gecorrigeerd, maar het correctiesysteem wordt daardoor een stuk complexer.



Figuur 2.5 Brandpuntsafstand (f) versus F-getal ($F\#$). Het gebied met realistische lenssystemen is met geel gearceerd. Afstand L is gevarieerd van 0.1 tot 2.5 km. Er vallen nu 10x10 isoplanatic patches binnen het gezichtsveld.

Een andere parameter die we kunnen wijzigen is de grootte van de apertuur. Die hadden we gelijk gesteld aan Fried's seeing parameter r_0 . Als we nu kiezen om de apertuur gelijk te maken aan 10 maal de seeing parameter, betekent dit dat we nog grotere aperturen nemen en dus dat het $F\#$ nog kleiner wordt. We zien dan ook in figuur 2.6 dat de curven omlaag schuiven en verder weg komen te liggen van het bereikbare gebied.



Figuur 2.6 Brandpuntsafstand (f) versus F-getal ($F\#$). Het gebied met realistische lenssystemen is met geel gearceerd. Afstand L is gevarieerd van 0.1 tot 2.5 km. De apertuur is nu gelijk aan 10 maal de grootte van een Fried cel.

We kunnen concluderen dat we alleen profijt kunnen hebben van adaptieve optiek technieken als we lenzen gebruiken met een zeer grote brandpuntsafstand, eigenlijk groter dan 2000 mm waar we in onze beschouwingen als bovengrens vanuit zijn gegaan of lenzen die extreem lichtsterk zijn door een zeer grote apertuur.

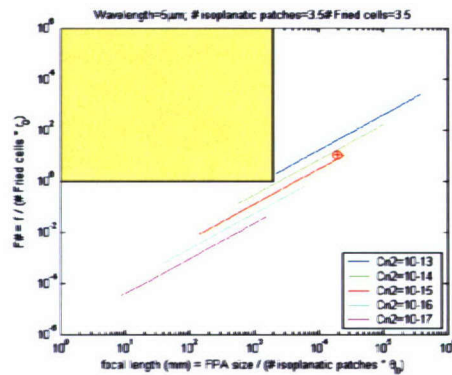
In de astronomie waar adaptieve optiek voor telescopen op aarde wordt gebruikt hebben we te maken met een telescoop met bijvoorbeeld de volgende specificaties (Keck telescoop):

- Apertuur = 10 meter
- Brandpuntsafstand = 17.5 meter
- F-getal = 1.76

De atmosfeer ter plekke van de telescoop heeft de volgende eigenschappen:

- $r_0 = 17.8 \text{ cm}$ @ 500 nm $\rightarrow r_0 = 2.82 \text{ m}$ @ 5 μm
- $\theta = 15.5 \text{ mrad}$ @ 500 nm $\rightarrow \theta = 0.25 \text{ mrad}$ @ 5 μm

Stel dat we in het primaire focus van de Keck telescoop de eerder gebruikte 3-5 μm detectorarray van 15.36 mm plaatsen. Het gezichtsveld wordt dan 0.877 mrad. Hier passen dus $0.877/0.25=3.5$ isoplanatic patches in. In de apertuur van 10 meter passen $10/2.82=3.5$ Fried cellen. Als we nu een figuur genereren gelijk aan figuur 2.5 en figuur 2.6 met de aanname dat het gezichtsveld 3.5 maal de grootte van de isoplanatic patch is en de apertuur 3.5 maal de grootte van een Fried cel, dan krijgen we figuur 2.7. In deze figuur hebben we met een roodcirkeltje omlijnde plus aangeven waar de Keck telescoop zich in deze plot bevindt. We zien dat de parameters van de Keck telescoop zich midden tussen de schuine lijnen met mogelijkheden bevindt en dat er met adaptieve optiek dus winst te boeken is, zoals natuurlijk te verwachten is.



Figuur 2.7 Brandpuntsafstand (f) versus F-getal ($F\#$). Het gebied met realistische lenssystemen is met geel gearceerd. Afstand L is gevarieerd van 0.1 tot 2.5 km.

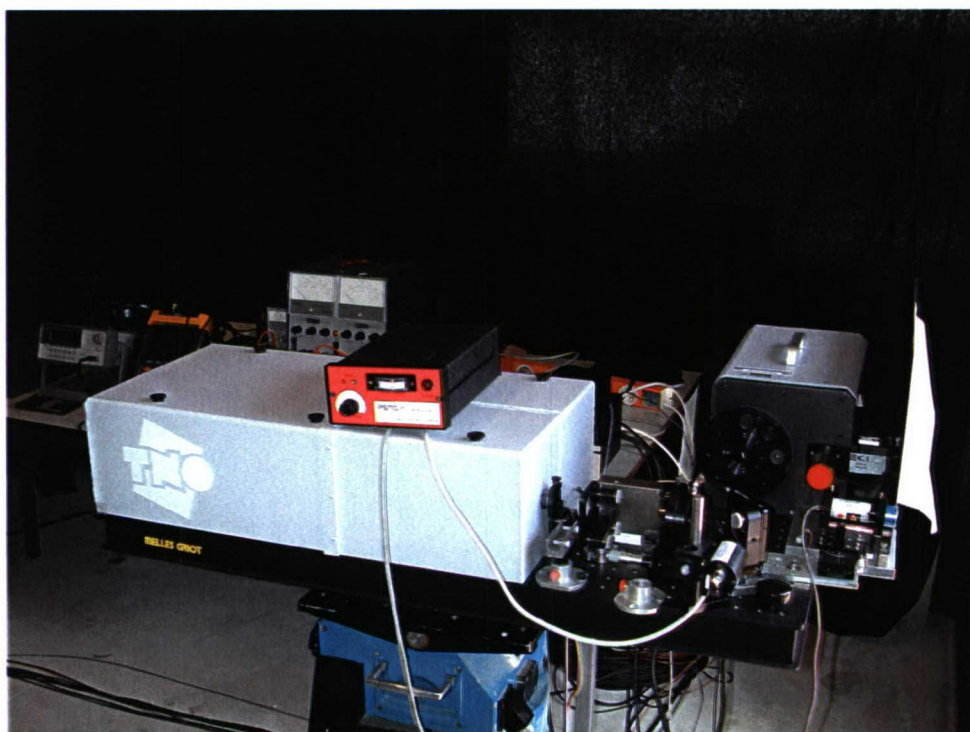
Als we voor deze geavanceerde optieken gebruik willen gaan maken van adaptieve optiek, dan moet ook nog bekeken worden hoe we het golffront kunnen detecteren. Hiervoor heb je een puntbron (een speculaire reflectie, of een laserreflectie) nodig op het object dat je waarneemt. In deze studie is aan dit systeemaspect nog geen aandacht besteed.

De bovenstaande formules en conclusies zijn alleen geldig voor lage turbulentieniveaus. Dit betekent in de praktijk ook dat de transmissiepaden beperkt zijn tot maximaal circa 1.7 km referentie [2] (hoofdstuk 2, p.187). In de figuur op pagina 187 van dezelfde referentie is te zien dat bij een transmissiepad van 1.7 km, in de meeste gevallen een verzadiging van de turbulentie optreedt. Dit betekent dat we niet meer in het regime van lage turbulentieniveaus zitten.

3 Adaptieve optiek voor DIRCM

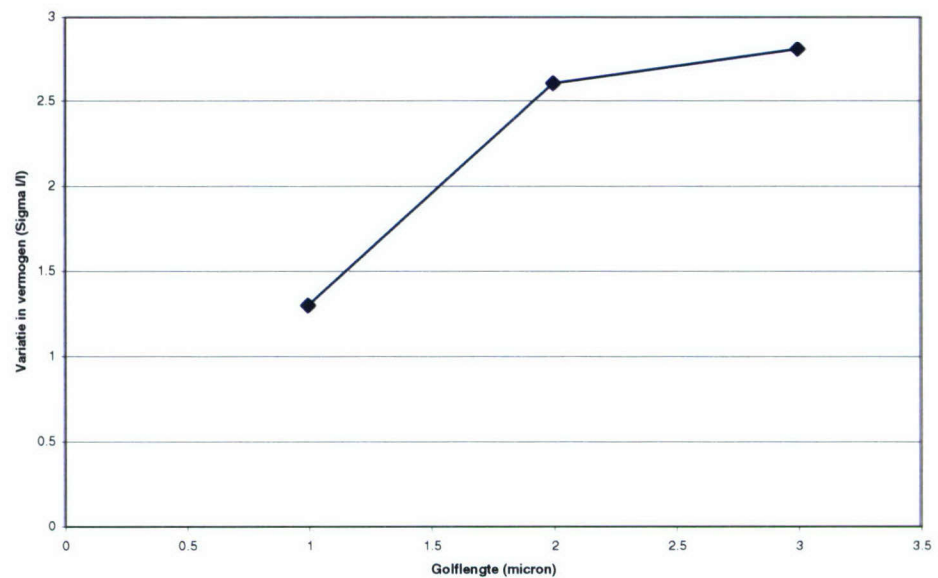
3.1 Invloed atmosferische turbulenties op jam patronen

In het kader van het project 'DIRCM Laser Jamming Study' (015.33845), zijn we in staat geweest een DIRCM laser demonstrator te ontwikkelen (zie figuur 3.1). Deze laser maakt gebruik van een Nd:YAG (1.064 μm) pomplaser in combinatie met periodiek gepoold lithiumniobaat kristal en niet lineaire conversie in een optisch parametrische oscillator (OPO) om laserlicht te genereren tussen de 1.5 en 4 micron. De pomplaser werkt met een instelbare herhalingsfrequentie tussen 0 en 100 kHz. Voor de DIRCM experimenten wordt vaak uitgegaan van een pomplaser frequentie van 30 kHz. Bovenop deze pomplaserfrequentie wordt een jam patroon gezet m.b.v. een acousto-optische modulator die de pomplaser bundel wel of niet de optische parametrische oscillator instuurt. In dit project wilde we onderzoeken in hoeverre een modulatiepatroon wat typisch ligt in de buurt van de 1 kHz wordt verstoord door optische turbulentie en scintillatie effecten.



Figuur 3.1 TNO DIRCM laser samen met zwarte straler.

Allereerst is de inherente stabiliteit van de TNO DIRCM laser onderzocht (zie figuur 3.2). Dit is gedaan voor de pomplaser en voor een tweetal golflengtes gegenereerd in de OPO, te weten 1.55 en 3.88 micron. Dit hebben we gedaan door direct aan de uitgang van een laser een detector te plaatsen die een deel van het vermogen dat werd uitgezonden detecteerde.



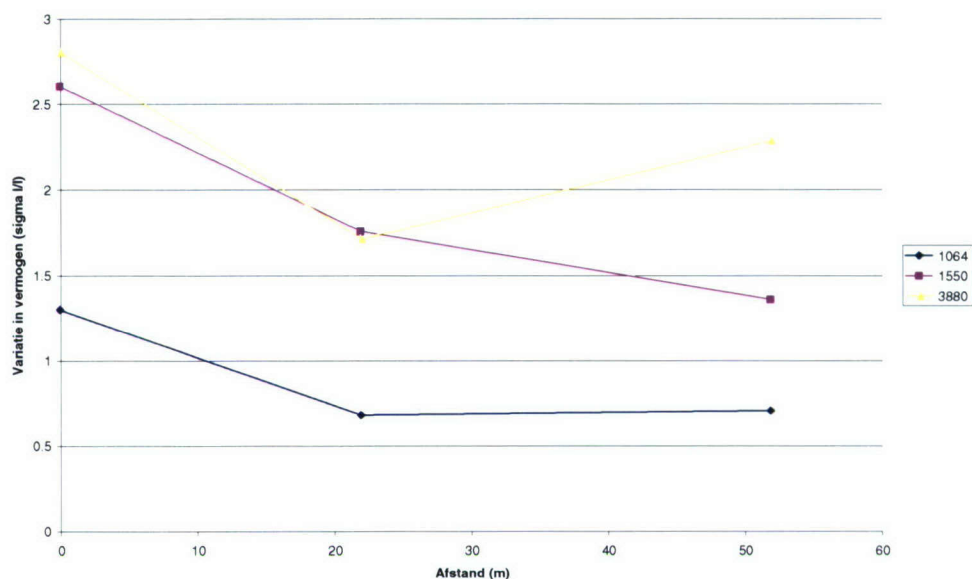
Figuur 3.2 Stabiliteit DIRCM laservermogen.

Het is te verwachten dat de pomplaser stabiel is dan de twee lasergolflengtes die in de OPO zijn gegenereerd. In het OPO proces worden de twee golflengtes vanuit een quantumfluctuaties niveau versterkt tot het uiteindelijke vermogen. Het is te verwachten dat statistische fluctuaties in het initiële quantumniveau doorspreken in het uitgezonden laservermogen.

De fluctuaties van het OPO vermogen kunnen nog groter zijn als in de buurt van de OPO threshold gewerkt wordt, maar in de experimenten zoals hierboven beschreven zaten we daar ver boven. De threshold zat bij de 0.5, 0.6 W pompvermogen terwijl de experimenten zijn uitgevoerd bij 3.1 W pompvermogen.

3.1.1 Korte padlengte

Vervolgens zijn op twee afstanden (22 en 52 meter) met een lens-detector combinatie ook metingen gedaan aan de laserstabiliteit om te bekijken of de atmosfeer extra fluctuaties veroorzaakt ten gevolge van atmosferische turbulentie. Op deze afstanden gebruikten we een lens met een apertuur van 5 cm wat representatief is voor de apertuur van een infrarood geleide raket. De resultaten zijn uitgezet in figuur 3.3 voor een pompvermogen van 3.1 W bij een pulsherhalingsfrequentie van 30 kHz.



Figuur 3.3 Intensiteitsfluctuaties als functie van padlengte en golflengte.

Wat opvalt, is dat de fluctuaties dicht bij de bron groter zijn dan op afstanden van 22 en 52 meter. De reden dat de laserfluctuaties dicht bij de bron (afstand 0 meter) groter zijn dan op enige afstand is waarschijnlijk te wijten aan het feit dat we op afstand 0 maar een fractie van de laserbundel hebben gemeten met een kleine detector. Dit heeft tot gevolg dat variaties in het bundelprofiel ook fluctuaties in het gedetecteerde vermogen geven, terwijl op afstanden van 22 en 52 meter deze bundelprofielvariaties meer worden uitgemiddeld.

De afstandsafhankelijkheid en de golflengte-afhankelijkheid van de intensiteitsfluctuaties zijn niet goed begrepen. Men zou verwachten dat een grotere afstand, een langer pad meer intensiteitsfluctuaties tot gevolg heeft. Ook het gebruik van een kleinere golflengte werkt intensiteitsfluctuaties in de hand ten gevolge van atmosferische turbulentie. Beide verwachte afhankelijkheden zijn in figuur 3.3 niet terug te vinden. Dit kan enerzijds komen door onnauwkeurigheden in de meting. Anderzijds speelt ook de grootte van de laserbundel een rol. Deze is voor de verschillende golflengte en afstanden anders. Zoals in tabel 3.1 te zien is geeft een variatie in bundeldiameter op een gelijke afstand een variatie in intensiteitsvariabiliteit.

Tabel 3.1 Afhangelijkheid van scintillatie van bundelbreedte 3.88 μm .

Afstand (m)	Bundelbreedte (cm)	Sigma I / I
22	11	1.72
22	5	1.63
52	13	2.29
52	6	1.89

3.1.2 Lange padlengte

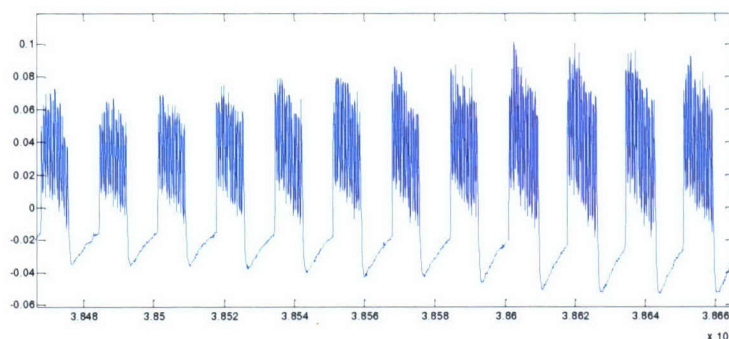
Een realistische padlengte voor een DIRCM laser ligt in de buurt van 1-5 km. Om de invloed van turbulentie op het jam patroon over een langer pad te bestuderen, hebben we een padlengte weten te bewerkstelligen van 900 meter. Bij de radarbol in de Duinen bij TNO Den Haag is de lens-detector combinatie geplaatst, terwijl de DIRCM laser op het dak van het TNO gebouw stond (niveau 4). Een retroreflector net boven de detector in combinatie met een thermische camera ter plekke van de DIRCM laser is gebruikt om de laser uit te lijnen op de lens-detector combinatie.

De DIRCM laser zond 3.88 micron laserlicht uit. De pomplaser stond op een herhalingsfrequentie van 30 kHz en via de acousto-optische modulator werd dit patroon gemoduleerd met een 1200 Hz blok met een duty-cycle van 50%. De detectorsignalen werden met een data acquisitiesysteem opgenomen.



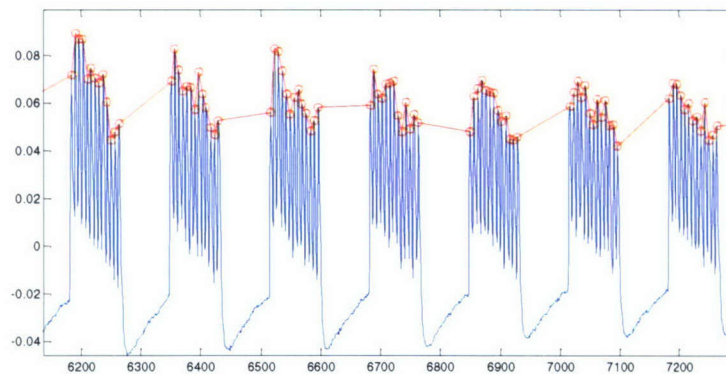
Figuur 3.4 Detectoropstelling op ca. 900 m van de DIRCM laserbron. De MCT detector die in het focus van een CaF_2 lens met apertuur van 5 cm diameter staat en de retroreflector voor de laser uitlijning zijn zichtbaar.

In figuur 3.5 is een typische recorder 'trace' te zien van de ontvangen signalen. Wat opvalt is dat er geen blokken compleet lijken weg te vallen en dat de variaties in signaalintensiteit geleidelijk gaan in de tijd.



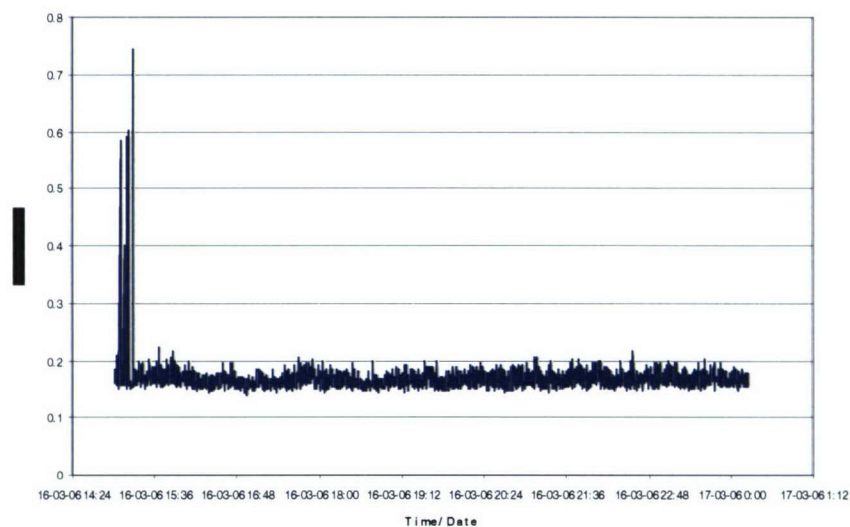
Figuur 3.5 Voorbeeld van de signalen zoals die worden ontvangen.

Om inzicht te krijgen in het verloop van de fluctuaties over de dag hebben we gedurende langere tijd de signaalfuncties gelogd. We hebben vervolgens de pieken van de 1200 Hz geselecteerd zoals weergegeven in figuur 3.6 en hiervan vervolgens de genormaliseerde standaard deviatie bepaald als functie van de tijd. Het resultaat is geplot in figuur 3.7.



Figuur 3.6 Ontvangen 100 Hz (50% duty cycle) + 1200 Hz signalen in blauw en de geselecteerde 1200 piek amplitudes in rood.

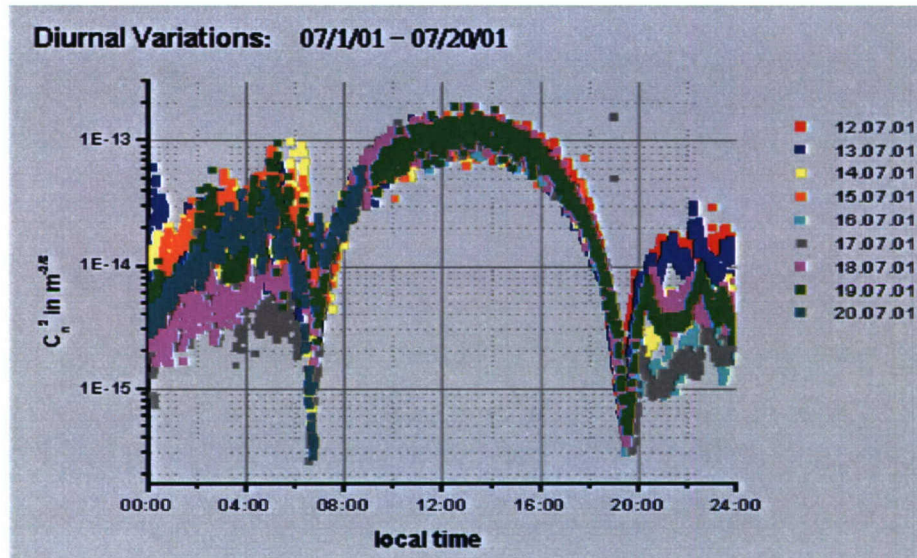
In figuur 3.7 is te zien dat de genormaliseerde standaard deviatie voor een meetsessie vanaf 15.00 tot na middernacht min of meer constant is. Dit is tegen de verwachting.



Figuur 3.7 De standaard deviatie genormaliseerd door te delen door het gemiddelde vermogen van het ontvangen signaal als functie van de tijd op de dag.

We verwachten dat we een zelfde periodiciteit zien die we bij C_n^2 kwadraatmetingen zien. In figuur 3.8 zijn C_n^2 metingen geplot voor een periode van 24 uur. Midden op de dag zijn de atmosferische turbulenties en dus de C_n^2 het grootst. Het minimum wordt bereikt tegen de ochtend en bij het vallen van de avond wanneer de luchttemperatuur gelijk wordt aan de temperatuur van het aardoppervlak. De C_n^2 metingen zoals in figuur 3.8 zijn weergegeven zijn gemeten op een warme dag in een woestijnklimaat. De tendens die is weergegeven over een periode van 24 uur is echter ook in andere klimaten en op minder warme dagen geldig. De enige verklaring die we nu kunnen geven voor de resultaten zoals getoond in figuur 3.7 is dat de fluctuaties veroorzaakt door de atmosferische turbulenties over het pad van 900 meter verwaarloosbaar zijn t.o.v. de inherente laser instabiliteiten. De enige manier om dit vermoeden te bevestigen is door de metingen te herhalen op een warmere dag waarbij de fluctuaties groter zijn of

de metingen te herhalen met een grotere padlengte. Maar operationeel gezien is de padlengte tussen de 1 en 5 kilometer gezien de dracht van de meeste hittezoekende projectielen. Uit andere bronnen is bekend dat delen van de lasermodulatie compleet kunnen wegvallen bij transmissie door uitlaatpluimen waar de turbulentie aanzienlijk groter is dan in de atmosfeer. Het is dus bevredigend om te kunnen constateren dat we dit effect bij een transmissie door de atmosfeer over een pad van ca. 900 meter niet hebben kunnen constateren.



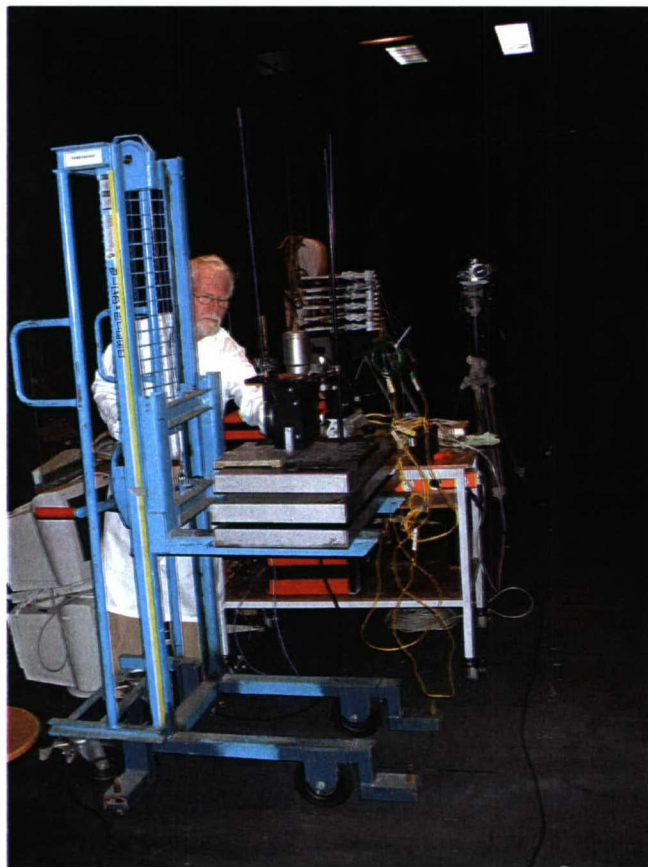
Figuur 3.8 Typische variatie van de turbulentiegraad uitgedrukt in C_n^2 gedurende een dag nacht cyclus (info FGAN/FOM) op een zeer warme dag in een woestijnklimaat.

3.2 Invloed hete luchtstroom

3.2.1 Opbouw opstelling

Uiteindelijk willen we weten in hoeverre de DIRCM laser verstoord wordt door de uitlaatpluim van een straalmotor. Deze experimenten zullen in EDA verband worden opgepikt. In voorbereiding hierop hebben we gekeken naar de invloed van een warme luchtstroom gecreëerd door een warmtekanon op de DIRCM laserbundel.

In de optische gang van TNO Den Haag hebben we een opstelling gemaakt waarbij gebruik werd gemaakt van een warmtekanon om een verticale turbulente hete luchtkolom te maken. De breedte van de kolom is ca. 30 cm. Temperatuursprofielen van deze warme luchtkolom zijn gemeten en worden elders gerapporteerd.



Figuur 3.9 Opbouw van opstelling in optische gang.



Figuur 3.10 Warmtekanon met daarboven een zestal thermokoppels die de temperatuur in de luchtkolom registreren.

In figuur 3.10 zijn de thermokoppels te zien die de temperatuur als functie van de plaats boven de uitstroomopening van het hete luchtkanon registreren. De temperatuur op een hoogte van 50 cm boven de uitstroomopening is als functie van de stand van het warmtekanon/blower opgesomd in tabel 3.2.

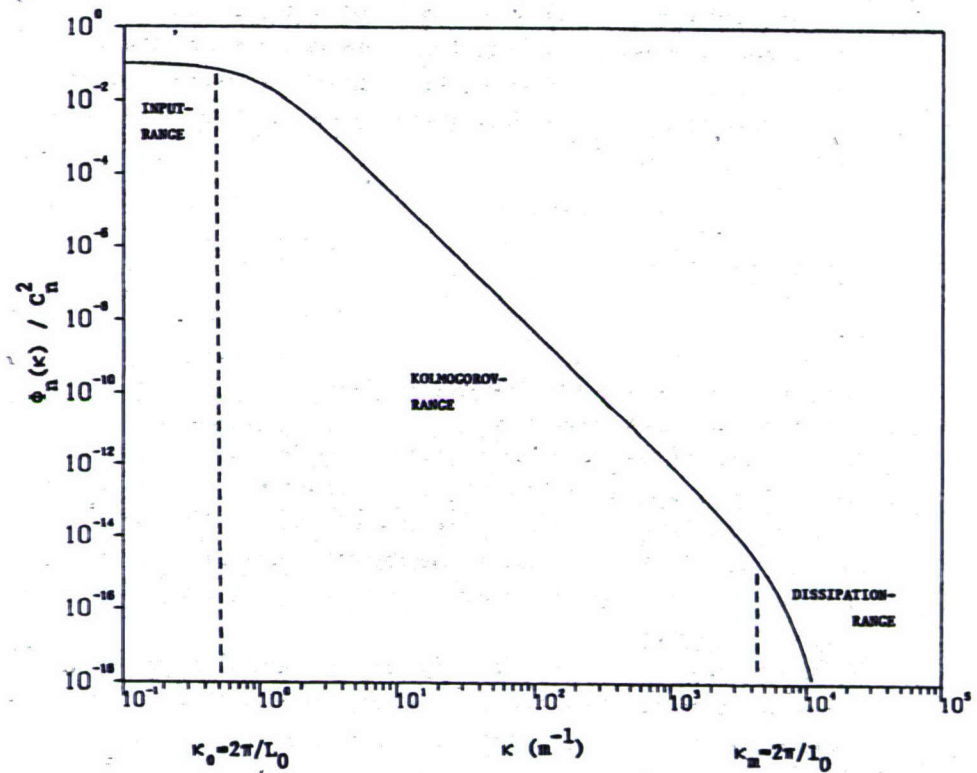
Tabel 3.2 Relatie tussen stand warmtekanon/blower en temperatuur vlak boven de uitstroomopening.

Stand warmtekanon	Temperatuur (°C)
0	20
1	62
1.5	130
2	170
2.5	232
3	281
3.5	330

3.2.2 Karakterisatie turbulentieniveau in de hete luchtkolom

Met behulp van de TNO scintillometer zijn de turbulentieniveaus in de hete luchtkolom gemeten. Voor de interpretatie van de getallen die uit de scintillometer komen, verwijzen we naar referenties [3], [4], [5]. Deze turbulentiegetallen kunnen we later vergelijken met turbulentiegetallen van echte uitlaatpluimen. In JP8.11 verband is door Zweden al melding gemaakt van verwachte turbulentieniveaus in pluimen van straalvliegtuigen. De structuurconstante C_n^2 zou liggen in de buurt van de 10^{-9} - $10^{-10} \text{ m}^{-2/3}$.

In het rapport van H. van Dongen [3] worden turbulentiemetingen beschreven die zijn gedaan in de OPAQUE trial op Ypenburg met behulp van de TNO laser scintillometer. Hierin wordt ook beschreven hoe de meetwaarden van de turbulentiemeter omgezet kunnen worden naar C_n^2 , de turbulentie structuurconstante.



Figuur 3.11 Kolmogorov spectrum van brekingsindex fluctuaties.

De atmosferische turbulentie kan gekarakteriseerd worden door de fluctuaties van de brekingsindex van de lucht in termen van een spatiele covariantie functie. Een equivalente beschrijving kan gegeven worden door hiervan de Fourier getransformeerde te nemen. Een spectrum dat redelijk de waargenomen turbulenties beschrijft wordt gegeven door het Kolmogorov spectrum:

$$\Phi_n(k) = 0.033 C_n^2 k^{-11/3}$$

De fysische interpretatie van dit spectrum is dat het de energie distributie geeft over de turbulentie cellen (eddies) van afmeting $l = 2\pi/k$. In het linker deel van figuur 3.11 met $k < k_0$ of $l > L_0$ zitten we aan de kant waar energie wordt ingevoerd in de vorm van grote turbulentiecellen (het zogenaamde invoer regime). Turbulentie onttrekt zijn energie van verschillen in windsnelheden in luchtlagen en convection door verwarming. Deze grote turbulentiecellen zijn niet stabiel en vallen uiteen in kleinere cellen die op hun beurt weer uiteenvallen in nog kleinere cellen. Als de turbulentiecellen te klein worden ($k > k_m$ of $l < l_0$) verliezen ze hun energie in de vorm van wrijving (het zogenaamde dissipatie regime). Alleen in het gebied tussen l_0 en L_0 heeft men in de vorm van het Kolmogorov spectrum een beschrijving van het spectrum van de turbulentiecellen. Daarbuiten zijn nog geen adequate theorieën beschikbaar.

Wanneer een laserbundel propageert door een turbulente luchtlaag, zullen de brekingsindexfluctuaties ervoor zorgen dat de intensiteit bij de ontvanger in de tijd fluctueren. Deze fluctuaties kunnen worden beschreven in termen van de standaarddeviatie van de gedetecteerde laserintensiteit (σ_I). Onder bepaalde aannames kunnen we een uitdrukking vinden voor deze standaarddeviatie σ_I .

Als we aannemen dat:

- De turbulentiegraad laag is en/of de padlengte klein is (de zogenaamde Rytov benadering).
- De statistische variaties in brekingsindex beschreven worden door een Kolmogorov spectrum (zie figuur 3.11).
- De Fresnel lengte $\sqrt{\lambda L}$ in ligt tussen het invoer en dissipatie regime $L_0 < \sqrt{\lambda L} < l_0$

Dan zijn de intensiteitsfluctuaties logaritmisch normaal verdeeld en geldt:

$$\sigma_{\ln I}^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (\text{plane wave})$$

$$\sigma_{\ln I}^2 = 0.5 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (\text{spherical wave})$$

waarbij k het golfgetal is en L de padlengte. Voor de TNO laserscintillometer heeft J. Molenaar correcties aangebracht op bovenstaande formule voor een sferische laserbundel i.v.m. de beperkte gezichtsvelden van laser en detector referentie [4], referentie [5]. Molenaar vindt dan:

$$\sigma_{\ln I}^2 = 0.176 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$$

In de praktijk kan de factor 0.176 nog iets anders liggen, maar dit is de beste theoretische afschatting die gemaakt kan worden voor de TNO scintillometer.

Omdat de intensiteitsfluctuaties een logaritmisch normaal verdeling volgen kan worden aangetoond dat:

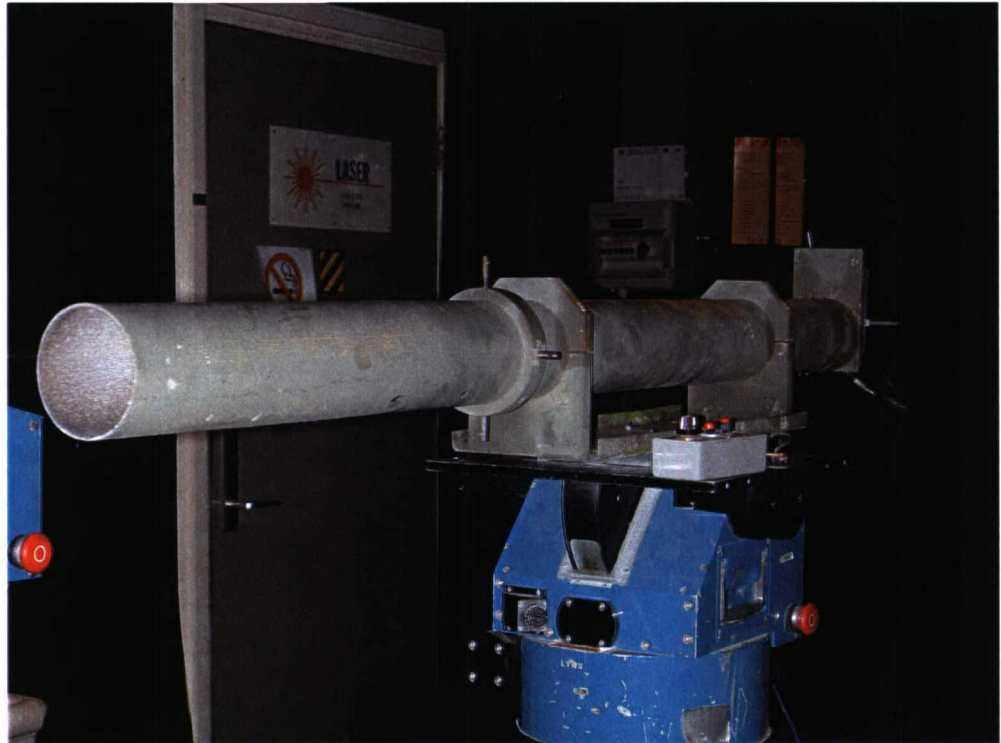
$$\left(\frac{\sigma_I}{I} \right)^2 = \exp(\sigma_{\ln I}^2) - 1$$

Dit is een belangrijk resultaat omdat σ_I/I gemakkelijk experimenteel gemeten kan worden.

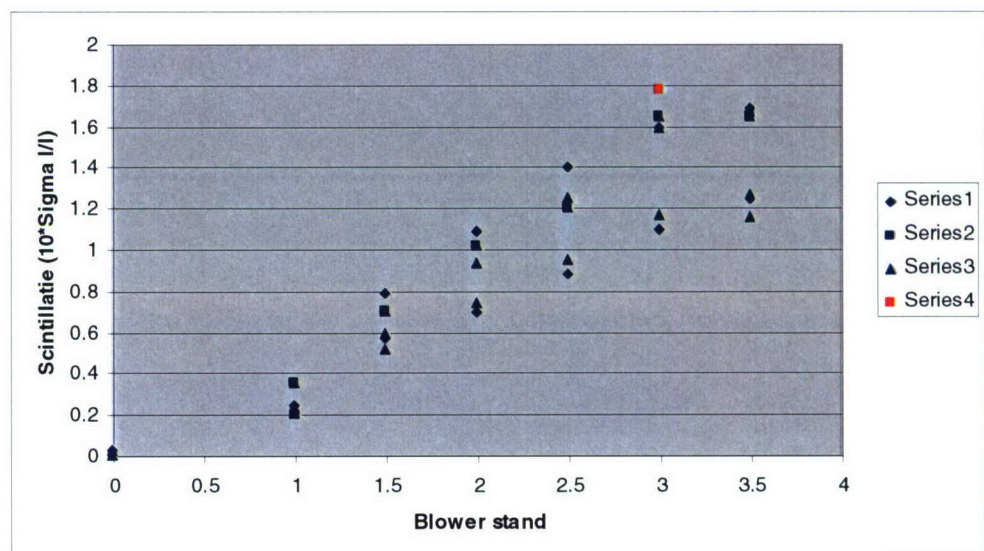
De TNO scintillometer (zie figuur 3.12) produceert een uitgangssignaal dat gelijk is aan 10-maal de relatieve standaarddeviatie σ_I/I . Twee uitgangen zijn beschikbaar, de ene middelt de relatieve standaarddeviatie over 20 seconden de ander over 100 seconden. Voor de metingen is gebruik gemaakt van de 20 seconden uitgang.

In bovenstaande afleiding is uitgegaan van een zwakke turbulentie en/of een kort transmissie pad. Voor een lang pad en/of sterke turbulentie gelden bovenstaande formules niet meer. De standaarddeviatie van de door turbulentie geïnduceerde scintillatie is dan niet langer evenredig met C_n^2 , de turbulentie structuur constante.

Het is bekend uit de literatuur dat de scintillatie in dat regime zelfs afneemt bij toenemende turbulentie. Dit effect wordt verzadiging genoemd. Het is dus de vraag of de metingen die zijn gedaan aan de warme luchtkolom met bovenstaande formules mogen worden omgezet naar C_n^2 waarden, omdat later zal blijken dat de gemeten turbulentieniveaus in de hete luchtstroom hoog zijn.



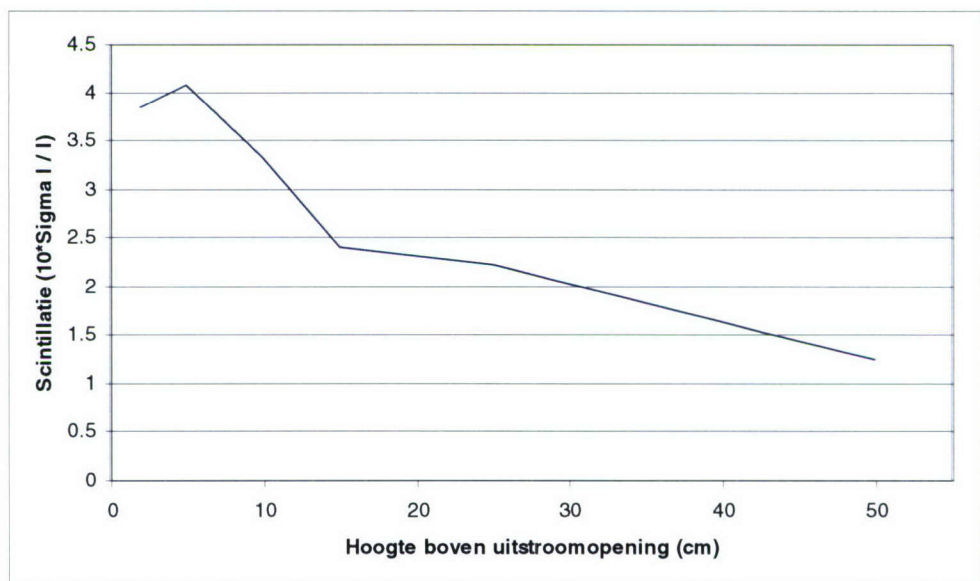
Figuur 3.12 Ontvanger van TNO laser scintillometer.



Figuur 3.13 Scintillatie als functie van de stand van het warmtekanon (metingen met grofgaas zijn blauw, meting met fijnmazig gaas is rood weergegeven). Scintillatiemeting op een hoogte van 50 cm boven de uitstroomopening.

In figuur 3.13 zijn alle scintillatiemetingen die over meerdere dagen zijn verspreid als functie van de stand van het warmtekanon uitgezet voor twee verschillende soorten gaas die vlak boven de uitstroomopening van het warmtekanon werd gehouden. Helaas zijn de meeste scintillatiemetingen gedaan met grofmazig gaas, terwijl de metingen met de DIRCM laser zijn gedaan met fijnmazig gaas waarvoor maar een scintillatiemeting beschikbaar is. Voor de metingen met grofmazig gaas zijn twee regimes te onderscheiden; een lage en een hoge scintillatiegraad. Dit heeft te maken met het dubbele grofmazige rooster dat boven de uitstroomopening van het warmtekanon is gelegd. Door de roosters onderling te verschuiven verandert de grootte van de uitstroomopeningen en wordt dus kennelijk de turbulentiegraad beïnvloedt. In figuur 3.13 is te zien dat de enkele meting met een fijnmazig gaas zelfs nog niet boven de hoge scintillatiewaardes ligt.

Het scintillatieniveau is ook afhankelijk van de hoogte boven het warmtekanon. De hoogte afhankelijkheid is uitgezet in figuur 3.14.



Figuur 3.14 Scintillatiegraad als functie van de hoogte boven de uitstroomopening.

Als we met bovenstaande formules de scintillatiewaarden omzetten naar C_n^2 waarbij we aannemen dat de padlengte 0.3 meter is (hierbij nemen we aan dat alleen de pluim significant bijdraagt aan de scintillatie en dat de rest van het pad tussen laser en scintillometer te verwaarlozen is) dan krijgen we de resultaten zoals vermeld in tabel 3.3. We zien meteen dat we in de meeste gevallen kunnen spreken over verschrikkelijk sterke turbulentie. De atmosfeer vertoont typische –waarden tussen de $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ (zwaar turbulent) tot $10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$ (zwak turbulent). Het is duidelijk dat we in de meeste metingen hier zwaar boven zitten. Het is dan ook maar de vraag in hoeverre we de bovenstaande formules mogen gebruiken aangezien die afgeleid zijn voor het geval van een zwakke turbulentiegraad.

Tabel 3.3 Relatie tussen blower stand, scintillatiewaarden en structuurconstante C_n^2 .

Stand blower	Sigma I / I	C_n^2
0.0	0.01	1.07e-16 (pad 25 m)
1.0	0.357	4.52e-10 (pad 0.3 m)
1.5	0.733	1.90e-09 (pad 0.3 m)
2.0	1.017	3.65e-09 (pad 0.3 m)
2.5	1.269	5.67e-09 (pad 0.3 m)
3.0	1.623	9.23e-09 (pad 0.3 m)
3.5	1.684	9.92e-09 (pad 0.3 m)

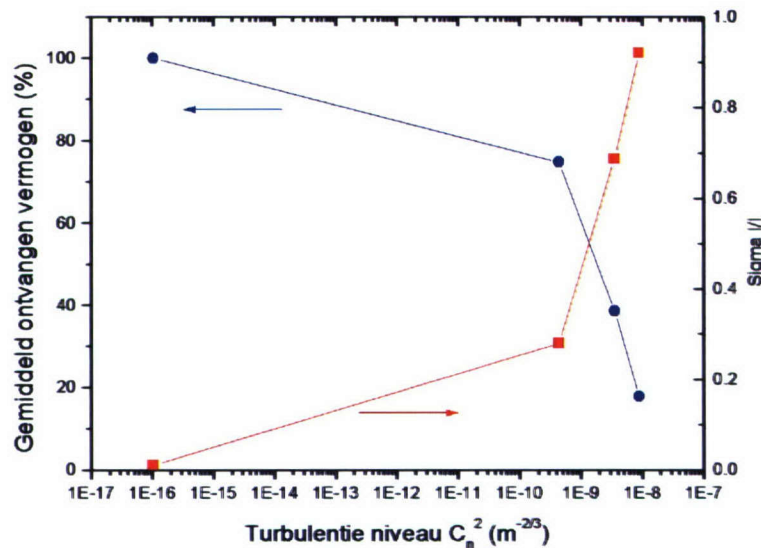
Als de bepaalde turbulentiesterktes wel kloppen, zijn ze van dezelfde orde als die in de pluim van een straaljager verwacht mag worden, want zoals eerder genoemd zou de turbulentiesterkte in de uitlaatpluim liggen in de buurt van de 10^{-9} - $10^{-10} \text{ m}^{-2/3}$.

3.2.3 Metingen met TNO DIRCM laser

De DIRCM laserbundel wordt horizontaal dwars door de hete luchtstroom geschoten. Daarna reflecteert de bundel aan een spiegel en gaat vervolgens een tweede keer door de luchtstroom heen om uiteindelijk terug te komen bij de laser waar een lens-detector combinatie de fluctuaties meet. We hebben weer gebruik gemaakt van dezelfde lens-detector combinatie met een optische apertuur van 5 cm. Het pad is nu ca. 0.6 meter lang.

De laserbundel loopt op ongeveer dezelfde hoogte boven de uitstroombuiging waarop ook de scintillatiemetingen zijn uitgevoerd. Er kon niet simultaan scintillatiemetingen worden uitgevoerd. De standen van de blower waarop de DIRCM metingen zijn uitgevoerd zijn daarom met behulp van tabel 3.3 omgezet naar turbulentieniveaus.

De metingen zijn uitgevoerd voor een golflengte van $3.88 \mu\text{m}$. Op de 30 kHz lasermodulatie is een jampatroon gezet van 1200 Hz met een duty-cycle van 50%. Het vermogen binnen één 1200 Hz periode wordt opgeteld en voor 100 periodes van de 1200 Hz wordt gekeken naar de fluctuaties daarin. Het gemiddelde ontvangen vermogen en de variaties zijn geplot in figuur 3.15. We zien dat tegelijkertijd als het gemiddelde ontvangen vermogen omlaag gaat de variaties enorm toenemen.



Figuur 3.15 Intensiteitsfluctuaties als functie van de temperatuur van een warmtekanon.

In tabel 3.4 hebben we nog de fluctuaties zoals die door de TNO scintillometer worden gemeten vergeleken met de fluctuaties zoals die met de DIRCM laser op 3.88 μm worden bepaald.

Tabel 3.4 Intensiteitsfluctuaties zoals gemeten met de TNO scintillometer en de TNO DIRCM laser.

Sigma I/I TNO scintillometer 0.6328 μm	Sigma I/I DIRCM laser 3.88 μm	Verhouding
0.010	0.010989	1.10
0.357	0.280035	1.27
1.017	0.687783	1.48
1.623	0.920710	1.76

Er kan worden afgeleid dat de volgende golflengte afhankelijkheid geldt:

$$\frac{\sigma_I}{I} \propto \sqrt{\exp(\lambda^{-7/6}) - 1}$$

σ_I/I zou volgens bovenstaande formule een constante factor 2.8 kleiner moeten zijn op 3.88 μm dan op 0.6328 μm . In tabel 3.4 zien we in de laatste kolom dat deze verhouding kleiner is en bovendien niet constant. Verklaringen moeten worden gevonden in het feit dat gecorrigeerd moet worden voor de grootte van de apertuur (5 cm) van de lens-detector combinatie die het 3.88 μm vermogen detecteerde en inherente stabiliteit van de DIRCM laser.

De laserbundel kan ook met adaptieve-optiek technieken worden gecorrigeerd zodanig dat de verstoringen van de turbulenties op het laserbundelprofiel worden gecompenseerd, maar ook hier geldt dat dit alleen zinvol is als de bundeldiameter bij de laser groter wordt dan de Fried parameter of als de detectorapertuur een ruimtehoek beslaat die groter is dan de 'isoplanatic patch'.

4 Conclusies

4.1 Adaptieve optiek voor camera-systemen

Voor het onderdrukken van beeldonscherpte ten gevolge van atmosferische turbulenties kan men alleen voor speciale optieken profijt hebben van adaptieve optiek. De beperkte inzet van adaptieve optiek van gangbare optieken wordt veroorzaakt door de kleine 'iso-planatic patch', oftewel de grootte van de atmosferische ruimtehoek waarbinnen met een enkele fasefrontmeting gecorrigeerd kan worden. Voor gangbare optieken betekent dit dat men maar een beeldveld ter grootte van 1 of 2 pixels zou kunnen corrigeren. Wil men over het hele beeldveld een verbetering zien dan kan dit alleen maar voor optieken met een zeer grote brandpuntsafstand en dus een zeer klein gezichtsveld, bovendien moeten de optieken erg lichtsterk zijn.

4.2 Adaptieve optiek voor DIRCM systemen

In WEAG studie JP8.11 is aangetoond dat in theorie adaptieve technieken een verbetering van de prestaties van een DIRCM systeem kunnen bewerkstelligen, doordat er meer laservermogen op de zoekkop van een warmtegeleidende raket kan worden geconcentreerd.

De voordelen van een adaptieve optiek in een DIRCM systeem worden op dit moment nog beperkt door de hedendaagse adaptieve optiek hardware componenten (vervormbare spiegels en golffrontsensoren). Deze zijn niet snel genoeg om de sterke turbulenties te kunnen compenseren. Hiervoor is nog een ontwikkeling op componentenniveau nodig. Een aanzet daartoe wordt in Eurofinder verband gezet (ATLAS project) door Duitsland, Frankrijk, Engeland en Italië.

In de huidige studie is naar voren gekomen dat door turbulenties (van vooral de uitlaatpluim van een straalmotor) ook het jampatroon enorm verstoord kan raken. Voor deze studies is de uitlaatpluim van een straalmotor gesimuleerd met een hete luchtstroom gegenereerd door een blower. Scintillatie metingen hebben aangetoond dat de turbulentieniveaus in de hete luchtstroom van dezelfde orde van grootte zijn van de turbulenties die we in de uitlaatpluim van een straaljager mogen verwachten, waarbij opgemerkt moet worden dat de scintillatiemeter waarmee de turbulentiegraad gemeten is buiten zijn werkbare gebied is gebruikt.

Uit de metingen door de warme luchtkolom heen is geconstateerd dat een 1 kHz modulatiepatroon extreem verstoord kan worden. Het gemiddeld ontvangen vermogen neemt af met een factor 5-6, terwijl tegelijkertijd de standaarddeviatie met een factor 15 toeneemt. Door deze sterke toename in de signaalfluctuaties wordt dus het jampatroon sterk vervormd.

Ook ter onderdrukking van deze verstoring van het jampatroon heeft het zin om adaptieve optiek te gebruiken. In experimenten aan echte pluimen moet deze conclusie worden bevestigd, studies die in het vervolg op JP8.11 (ERG 108.019) zijn gepland. Voor deze toepassing van adaptieve optiek gelden dezelfde hardwarematige beperkingen zoals aangegeven in het begin van deze subparagraaf.

5 Referenties

- [1] R.K. Tyson; Introduction to adaptive optics;
SPIE Press, tutorial text in optical engineering vol. TT41;
ISBN 0-8194-3511-2, (2000).
- [2] The Infrared and Electro-Optical Systems handbook;
Vol.2 Atmospheric Propagation of Radiation, ed. F.G. Smith;
SPIE optical engineering press, ISBN 0-8194-1072-1, (1993).
- [3] H.M.J. van Dongen;
*Analysis of turbulence related measurements and data of the Netherlands
OPAQUE station*;
TNO report PHL 1982-67, (1982).
- [4] J. Molenaar;
Turbulence measurements with an incoherent source;
TNO Lab report PHL 1978-29 (1978).
- [5] J. Molenaar;
Theorie van de laserscintillometer;
TNO repot PHL 1978-16 (1978).

6 Ondertekening

Den Haag, september 2006

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized 'J' followed by a horizontal line and a small flourish.

dr. ir. J. Olijslager
Afdelingshoofd

TNO Defensie en Veiligheid

A handwritten signature in blue ink, featuring a large, stylized 'B' followed by a horizontal line and a small flourish.

dr. H.H.P.Th. Bekman
Auteur

REPORT DOCUMENTATION PAGE
(MOD-NL)

1. DEFENCE REPORT NO (MOD-NL) TD2006-0093	2. RECIPIENT'S ACCESSION NO -	3. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NO TNO-DV 2006 A336
4. PROJECT/TASK/WORK UNIT NO 015.31313	5. CONTRACT NO A01KM769	6. REPORT DATE September 2006
7. NUMBER OF PAGES 35 (excl RDP & distribution list)	8. NUMBER OF REFERENCES 5	9. TYPE OF REPORT AND DATES COVERED Final
10. TITLE AND SUBTITLE Military applications of adaptive optics		
11. AUTHOR(S) dr. H.H.P.Th. Bekman, ing. F.J.M. van Putten, P.J. Fritz		
12. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES) TNO Defence, Security and Safety, P.O. Box 96864, 2509 JG The Hague, The Netherlands Oude Waalsdorperweg 63, 2597 AK Den Haag, The Netherlands		
13. SPONSORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES) Royal Netherlands Navy		
14. SUPPLEMENTARY NOTES The classification designation Ongerubriceerd is equivalent to Unclassified, Stg. Confidentieel is equivalent to Confidential and Stg. Geheim is equivalent to Secret.		
15. ABSTRACT (MAXIMUM 200 WORDS (1044 BYTE)) In this project the benefits of adaptive optics for military applications are assessed. Adaptive optics can be used in electro-optical camera systems and it can be used in laser systems such as directed infrared counter measure systems. In a WEAG project JP8.11 on Precision Laser Beam Steering the benefits of adaptive optics for long range target identification and DIRCM have been evaluated. The findings of the study group are reported in TNO report FEL-04-A102. In this project we have studied some of the questions raised in JP8.11 in more detail. The first question is for which optical detection systems adaptive optics can bring some benefits. It was concluded that only for lenses with very large focal numbers and therefore very small field of view adaptive optics can be beneficial. This is caused by the very small atmospheric 'iso-planatic' patch which is typical of the order of 1 mrad. We have also studied the influence of atmospheric or plume turbulence on the jam modulation pattern. We have found that plume turbulence levels can severely distort the jam pattern, thus increasing the break-lock time or making the jamming ineffective. This aspect will be further studied in an EDA project.		
16. DESCRIPTORS Infrared cameras, Imaging, Lasers, Infrared Countermeasures, Adaptive optics, Turbulence		IDENTIFIERS
17a. SECURITY CLASSIFICATION (OF REPORT) Ongerubriceerd	17b. SECURITY CLASSIFICATION (OF PAGE) Ongerubriceerd	17c. SECURITY CLASSIFICATION (OF ABSTRACT) Ongerubriceerd
18. DISTRIBUTION AVAILABILITY STATEMENT Unlimited		17d. SECURITY CLASSIFICATION (OF TITLES) Ongerubriceerd

Distributielijst

Onderstaande instanties/personen ontvangen het managementuittreksel en de distributielijst van het rapport.

4 ex.	DMO/SC-DR&D
1 ex.	DMO/ressort Zeesystemen
1 ex.	DMO/ressort Landsystemen
1 ex.	DMO/ressort Luchtsystemen
2 ex.	BS/DS/DOBBP/SCOB
1 ex.	MIVD/AAR/BMT
1 ex.	Staf CZSK
1 ex.	Staf CLAS
1 ex.	Staf CLSK
1 ex.	Staf KMar
1 ex.	TNO Defensie en Veiligheid, Algemeen Directeur, ir. P.A.O.G. Korting
1 ex.	TNO Defensie en Veiligheid, Directie Directeur Operaties, ir. C. Eberwijn
1 ex.	TNO Defensie en Veiligheid, Directie Directeur Kennis, prof. dr. P. Werkhoven
1 ex.	TNO Defensie en Veiligheid, Directie Directeur Markt, G.D. Klein Baltink
1 ex.	TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Den Haag, Manager Beleidsstudies Operationele Analyse & Informatie Voorziening (operaties), drs. T. de Groot
1 ex.	TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Rijswijk, daarna reserve Manager Bescherming, Munitie en Wapens (operaties), ir. P.J.M. Elands
1 ex.	TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Rijswijk, Manager BC Bescherming (operaties), ir. R.J.A. Kersten
1 ex.	TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Soesterberg, Manager Human Factors (operaties), drs. H.J. Vink

Onderstaande instanties/personen ontvangen een volledig exemplaar van het rapport.

- | | |
|-------|--|
| 1 | DMO/SC-DR&D
standaard inclusief digitale versie bijgeleverd op cd-rom |
| 2/3 | DMO/DR&D/Kennistransfer |
| 4 | Programmabegeleider Defensie, Projectbegeleider Defensie
W. Pelt, DMO/DWS&B/RZS/OB&I TV |
| 5 | ltz 2 ir. S.C. Horenberg,
DMO/DWS&B/RZS/OB&I |
| 6 | ltz 1 M. Simmeren
DS/DOBBP |
| 7 | dr. T. Hupkens,
KIM, Den Helder |
| 8/10 | Bibliotheek KMA |
| 11 | Bibliotheek KIM |
| 12 | TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Den Haag,
Manager Waarnemingssystemen (operaties), dr. M.W. Leeuw |
| 13 | Programmaleider TNO Defensie en Veiligheid
dr. P.B.W. Schwering (tevens co-auteur) |
| 14/15 | TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Den Haag,
Archief |
| 16/24 | TNO Defensie en Veiligheid, vestiging Den Haag,
Business Unit Waarnemingssystemen,
dr. H.H.P.Th. Bekman
ing. F.J.M. van Putten
P.J. Fritz
dr. ir. H.M.A. Schleijsen
dr. J.C. van den Heuvel
dr. A.L. Mieremet
drs. K.W. Benoist
dr. A.M.J. van Eijk
ir. F.L.M. van den Bogaart |
| 25 | TNO Industrie, vestiging Delft
ing. J.A.P. Leijtens |
| 26 | NIVR |

