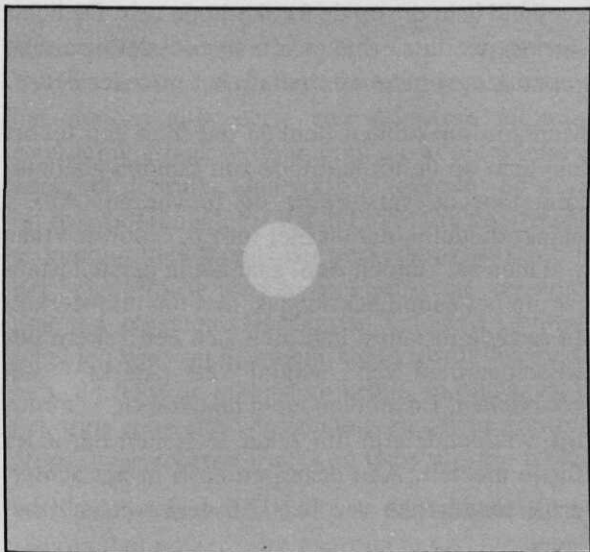


Waarnemingsprestaties met helderheidsversterkingskijkers en warmtebeeldapparatuur

In 1787 verrasten Utrechtse patriotten de prinsgezinde troepen bij Jutphaas. Met achterlating van wapens en persoonlijke eigendommen vluchtten de laatsten bij Vreeswijk over de Lek. Het verrassingseffect werd bereikt door de aanval na zonsondergang in te zetten en gebruik te maken van de duisternis. In die tijd was dat uitzonderlijk. Tegenwoordig streeft men systematisch ernaar ook in het duister te kunnen opereren, en men kan spreken van een soort technologische slag om het duister, met als wapens slagveldverlichting, infraroodapparatuur, helderheidsversterkers en warmtebeeldapparatuur. Kennis van het visuele-waarnemingsvermogen met of zonder deze hulpmiddelen is daarmee van groot militair belang geworden.

Op welke afstand kan men een tegenstander zien naderen, resp. zelf worden waargenomen? Dat hangt natuurlijk af van het lichtniveau, maar hóe precies? In dit artikel wordt een beknopt overzicht gegeven van het onderzoek op dit gebied door het

Afb. 1 Eén van de elementaire visuele taken is de detectie van een schijfje met helderheid $B + dB$ op een achtergrond met helderheid B



Instituut voor Zintuigfysiologie (IZF), dat deel uitmaakt van de Hoofdgroep Defensie Onderzoek van TNO. Dit onderzoek begon 40 jaar geleden met de bouw van een nachtzientrainer voor de Koninklijke marine, en concentreert zich thans op de mogelijkheden van digitale beeldbewerkingstechnieken.

Nachtzien met het blote oog

In de jaren '40 begonnen zintuigfysiologen te begrijpen dat het blote oog op zichzelf als een zeer gevoelig instrument kon worden beschouwd in vergelijking met de fotografie en met de eerste tv-camera's, die beide veel meer licht nodig hadden dan het oog om goed te kunnen werken. Een goede manier om de prestatie van het oog bij lage lichtniveaus vast te stellen is weergegeven in afb. 1. Men laat de proefpersoon kijken naar een egaal veld met een bepaalde helderheid B , waarop zich in het midden een cirkelvormig schijfje bevindt welks helderheid een kleine hoeveelheid dB hoger is. De verhouding dB/B wordt het contrast genoemd. Het gaat nu erom het drempelcontrast te meten waarbij de proefpersoon het schijfje nog net kan zien. Hoe lager dat is, hoe beter. Voert men de meting uit bij steeds lagere helderheden, dan blijkt dat men steeds meer contrast nodig heeft; niet omdat het oog het slechter gaat doen, maar omdat er minder licht is. Er is nu eenmaal een vast verband tussen de hoeveelheid licht en de hoeveelheid informatie die ermee kan worden overgedragen. Het verrassende is nu dat het oog op zichzelf goed blijft functioneren tot op zeer lage lichtniveaus. Men ziet dan veel minder, maar men ziet wel alles wat mogelijk is, gegeven de kleine hoeveelheid licht. Juist in het donker springt het oog zuinig om met het licht. Pas bij de hogere daglichtniveaus, als het niet meer van belang is, wordt het wezenlijk minder gevoelig. Zeer bewonde-

renswaardig is dat het oog wat het lichtniveau betreft goed functioneert over een meetgebied van $1:10^{12}$. Geen technisch instrument presteert dat uit zichzelf. Natuurlijk, met automatische aanpassingen kan men een heel eind komen. Dat is dan ook de „truc” van het oog: het past zich steeds aan bij het lichtniveau. Deze aanpassing kost wel tijd, zoals iedereen weet die uit het licht in het donker stapt. Men spreekt dan van donkeradaptatie. Het doel van de reeds genoemde nachtzientrainer was onder meer het marinepersoneel vertrouwd te maken met de noodzaak van goede donkeradaptatie.

De bevinding dat de begrenzing van het zien in het donker veel meer een kwestie is van te weinig licht dan van de werking van het oog zelf, verklaart ook dat pogingen in de Tweede Wereldoorlog om mensen te selecteren op bijzonder goede nachtzienvermogens, niet veel resultaat opleverden.

Nachtkijkers

Het klassieke hulpmiddel om bij lage lichtniveaus meer te zien dan met het blote oog, is de nachtkijker. Dat is een gewone kijker met een zo groot mogelijke intreepupil, bv. met een doorsnede van 50 mm (de intreepupil van het oog wordt in het donker weliswaar groter maar blijft toch beperkt tot 7 à 8 mm). Met die grotere intreepupil vangt de nachtkijker ca. 50-maal meer licht. Dit licht komt er aan de oogzijde uit door een opening van bv. 7 mm en als het oog goed daarachter wordt gehouden komt het allemaal in het oog terecht. De lichttechnische functie van de nachtkijker is dus dat hij meer licht het oog binnensluis. Dat gaat echter gekoppeld met de beeldvergroting, die men als het ware op de koop toe moet nemen, en waaraan men op zichzelf in het donker eigenlijk niets heeft. Met aftrek van enkele verliesposten komt er bij gebruik van een goede nachtkijker ca. 40-maal meer licht in het oog dan zonder. Met andere woorden: het lichtniveau kan 40-maal lager zijn om hetzelfde te zien.

Stelt men geen hoge eisen aan de hanteerbaarheid dan kan men nog wel grotere nachtkijkers maken, maar dan neemt ook de beeldvergroting toe. Voor het detecteren van puntbronnen (d.w.z. schijfjes met een oneindig kleine diameter in de zin van afb. 1) is dat geen bezwaar. Zulke grote nachtkijkers worden dan ook vaak als sterrekijker ge-

bruikt. Maar voor de normale waarneming te velde begint de beeldvergroting al snel tegen te werken, omdat het oog de waar te nemen objecten dan niet meer kan overzien. Bovendien wordt het gezichtsveld hoe langer hoe kleiner. Er zijn dus praktische grenzen, die de lichtinvang van nachtkijkers voor militair gebruik beperken tot 40- à 60-maal die van het blote oog.

Helderheidsversterkers

Deze grens is doorbroken door de ontwikkeling van helderheidsversterkers (HV). Men kan HV-kijkers opvatten als nachtkijkers waarbij tussen het objectief (de lens aan de voorzijde) en het oculair (de lens aan de oogzijde) een opto-elektronisch beeldbuisje is geplaatst. Dit heeft aan de objectiefzijde een vlakke lichtgevoelige fotokathode en aan de oculairzijde een vlak lichtgevend beeldscherm. Het licht dat op de lichtgevoelige plaat van het beeldbuisje valt, maakt daarin elektronen vrij. Deze bewegen zich onder elektrische spanning in de richting van het beeldscherm, krijgen daarbij een grotere energie, treffen ten slotte het beeldscherm en wekken daarbij een lichtflitsje op. Er zijn ook andere varianten, maar het principe is steeds, dat licht eerst in elektronen wordt omgezet en vervolgens weer in licht met daartussen een elektronisch versterkingsproces.

Het moge duidelijk zijn dat het lichtniveau op het beeldscherm nu het produkt is van twee factoren: het aantal lichtflitsjes en de lichtsterkte per flitsje. Het aantal hangt direct samen met de hoeveelheid licht die op de fotokathode valt. De lichtsterkte per flitsje hangt af van het elektronische versterkingsproces en staat als het ware ter keuze.

Men zou nu kunnen denken dat men een tekort aan licht op de fotokathode zou kunnen goedmaken door de versterking op te voeren. Afb. 2 maakt duidelijk dat dit niet juist is. Voor de vraag wat men zal kunnen zien, gaat het in eerste instantie om het aantal lichtflitsjes, niet om hun sterkte. In tweede instantie kan men zich een zekere uitwisselbaarheid van „aantal” en „sterkte” wel voorstellen. Bovendien moet de „sterkte” natuurlijk voldoende zijn om zeker te stellen dat ieder flitsje meetelt. Aan deze punten is in het achtergrondsonderzoek van het IZF veel aandacht besteed.

Afb. 2 Afbeelding van een tank, gemaakt met een helderheidsversterker. De afbeelding is opgebouwd uit lichtflitsjes. Het aantal lichtflitsjes hangt af van het oorspronkelijke lichtniveau. De sterkte van de lichtflitsjes hangt af van de apparatuur. Wat men kan zien hangt in de eerste plaats af van het aantal lichtflitsjes. De lichtflitsjes moeten wel sterk genoeg zijn, maar maakt men ze dan nog sterker, dan helpt dat niet meer



Net als bij de nachtkijker gaat het dus om de hoeveelheid licht die wordt ingevangen, en dat betekent meteen dat een groot deel van de winst ook bij HV-kijkers van de grote intreepupil komt. Daarbij komt echter nog dat moderne fotokathoden gevoeliger zijn dan het netvlies van het oog en bovendien naar een breder „spectrum” kijken. In totaal kunnen hanteerbare HV-kijkers ca. 150-maal meer licht invangen dan nachtkijkers. Ten opzichte van nachtkijkers is er echter nog een tweede belangrijk voordeel: de winst is niet gekoppeld aan de vergroting. De vergroting kan dus nog vrij worden gekozen, bv. éénmaal (of geen vergroting), hetgeen de mogelijkheid heeft geopend voor het gebruik als rijkijker bij de besturing van voertuigen in het donker.

Herkenningsproeven

Voor een goede beantwoording van de vraag welke waarnemingsprestaties men mag verwachten is het noodzakelijk eerst een relevante militaire waarnemingstaak te definiëren die kenmerkend is voor het gebruik. Daarvoor is gekozen: de wens op zo groot mogelijke afstand militaire voertuigen te kunnen herkennen. Bij herkenningproeven is het belangrijk te werken met een vaste verzameling van objecten. Herkennen betekent „onderscheiden van” en de moeilijkheid wordt dus mede bepaald door de andere objecten. In ons geval is gekozen voor een verzameling van twee soorten jeeps, twee soorten trucks en twee soorten tanks.

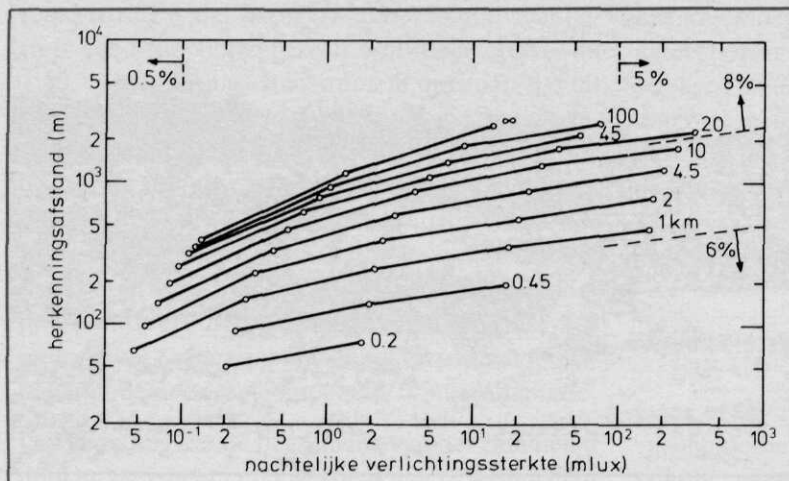
Het idee is nu dat men steeds één van deze laat zien en dan vraagt welk voertuig het is. De proef-

persoon kan dan kiezen uit zes mogelijke antwoorden. Het percentage correcte antwoorden wordt gemeten en tevens kan worden onderzocht welke voertuigen met elkaar worden verward.

De meeste experimenten werden binnenshuis uitgevoerd door diaprojectie van te velde gemaakte foto's. Voor systematisch onderzoek is het nodig alle condities gemakkelijk te kunnen controleren en variëren wanneer men dat zelf wil. Bij veldexperimenten is dat praktisch onmogelijk en de kosten zouden ook al snel zeer hoog worden (zoals bleek bij een in samenwerking met het Opleidingscentrum der Cavalerie uitgevoerd veldexperiment om de realiteitswaarde toch ten minste éénmaal te toetsen). Om een lang verhaal kort te houden: de experimenten werden zo ingericht dat voor een bepaald lichtniveau en bij een bepaalde waarde van het atmosferische zicht (of het helder weer is, of heig of mistig) het percentage correcte antwoorden kon worden gemeten als functie van de afstand. Vervolgens kon de afstand worden vastgesteld waarop men nog net 50% correcte antwoorden mag verwachten, hetgeen ruwweg betekent dat de jeeps als jeep, de trucks als truck en de tanks als tank worden herkend.

Reikwijdte

Afb. 3 geeft een overzicht van de resultaten voor één bepaald type HV-kijker in termen van de reikwijdte als functie van het lichtniveau en bij verschillende zichtcondities. Dit betreft een sniper-scope, die op het geweer kan worden gemonteerd. Met grotere typen kunnen grotere reikwijdten



Afb. 3 De reikwijdte van een typische draagbare helderheidsversterkingskijker bij verschillende zichtcondities (parameter) en lichtniveaus (horizontale as). In 95% van de gevallen ligt het lichtniveau in Nederlandse nachten (1 uur na zonsondergang tot 1 uur voor zonsopkomst) tussen 0,1 en 100 mlux; het zicht bedraagt in 80% van de gevallen meer dan 1 km en minder dan 20 km

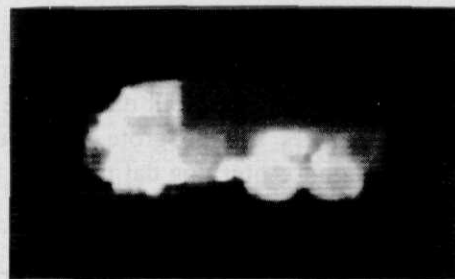
worden bereikt, maar vergeleken met wat men graag zou willen valt het toch tegen. Opvallend is de grote afhankelijkheid van de atmosferische condities.

Sedert omstreeks 1970 zijn op deze manieren talrijke HV-kijkers in opdracht van de Koninklijke landmacht onderzocht en beoordeeld. Deze benadering in het bijzonder leent zich heel goed voor de vergelijking van verschillende typen. Er is geen enkele reden om eraan te twijfelen dat de vergelijking te velde anders zou uitvallen dan in deze simulatieproeven binnen het laboratorium. In absolute zin moet men echter voorzichtig zijn. In het algemeen zal het buiten moeilijker zijn dan binnen. Binnen is het comfort voor de proefpersonen veel groter en worden de kijkers optimaal afgesteld. Of de in het laboratorium bepaalde reikwijdte ook te velde zal worden waargemaakt hangt mede af van dergelijke secundaire voorwaarden. De verkregen resultaten kunnen ook heel goed worden geïnterpreteerd volgens een eenvoudig theoretisch model. Daarin wordt primair uitgegaan van de lichtomvang; vervolgens wordt gekeken of de versterking voldoende groot is, en ten slotte wordt gelet op het effect van de afbeeldingskwaliteit. Met behulp van dit model is reeds aan de hand van het ontwerp vast te stellen welke waarnemingsprestaties men kan verwachten.

Warmtebeelden

HV-kijkers werken met het licht van maan en sterren, dat op de scène valt en wordt gereflecteerd. De basiscontrasten zijn in dit geval constant en in

Afb. 4 Typisch warmtebeeld van een voertuig, dat zojuist heeft gereden



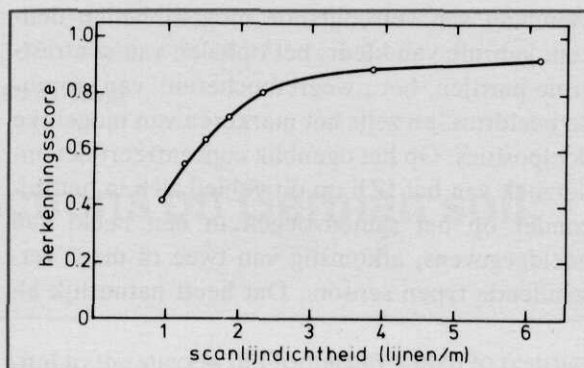
principe beperkt. Met warmtebeeldapparatuur daarentegen wordt straling geregistreerd, die door warme objecten zelf wordt uitgezonden. De contrasten daarbij zijn zeer grillig en vaak groot, vooral die van motorblokken en uitlaatpijpen (zie afb. 4). In zekere zin komt de contrastgevoeligheid er minder op aan, en het variabele „lichtniveau” speelt helemaal geen rol. Van groter belang is nu het oplossende vermogen. Daarbij moet worden bedacht dat warmtebeelden, net als bij de televisie, door aftasting met één of meer sensors worden opgebouwd. De vraag naar het noodzakelijke oplossende vermogen komt hier, praktisch gesproken, neer op de vraag naar het aantal aftastlijnen waarmee objecten moeten worden afgetast om herkenbaar te worden. Als dat bekend is, kan de reikwijdte gemakkelijk worden afgeleid uit de aftastlijndichtheid van de apparatuur, uitgedrukt in het aantal lijnen per milliradiaal. Op grond van deze afwegingen werd besloten allereerst te onderzoeken hoe de herkenning van een verzameling warmtekaracteristieken van militaire voertuigen afhangt van de scanlijndichtheid ter plaatse van die objecten.

De warmtekaracteristieken werden ter beschikking gesteld door het Fysisch en Elektronisch Laboratorium van de Hoofdgroep Defensie Onder-

zoek van TNO, weer in de vorm van diapositieven. Deze werden met een speciaal daarvoor gebouwde opstelling met een variabele aftastlijndichtheid afgetast, en vervolgens aan proefpersonen getoond. Afb. 5 toont de resultaten; het blijkt dat 70% correcte antwoorden wordt bereikt bij een aftastlijndichtheid van ruwweg 2 lijnen per meter, gemeten bij de objecten. Afb. 5 geeft de gemiddelde resultaten weer voor zes voertuigen in drie verschillende oriëntaties en met twee verschillende opwarmcondities. Als gevolg van de betrekkelijke grilligheid van de warmtekaracteristieken wijken de resultaten per object soms sterk af van de gemiddelden. Hete vooraanzichten bv. blijken zeer moeilijk herkenbaar, hoe hoog de aftastlijndichtheid ook wordt gemaakt. Dat is heel begrijpelijk, omdat de diffuse spreidingsbeelden van de door de motorblokken uitgestraalde warmte weinig kenmerkende details bevatten.

In dit onderzoek werd gewerkt met duidelijk registreerbare, maar zeker geen extreem sterke warmtekaracteristieken. In dat geval komen wij tot een zeer eenvoudig model voor de reikwijdte: vertaal de afmeting van de sensor in de lijndichtheid ter plaatse van het doel als functie van de afstand. Voor een warmtekijker met 140 aftastlijnen in een gezichtsveld van 2° wordt de reikwijdte op deze wijze ca. 2400 m, en dat komt goed in de buurt van hetgeen wordt gewenst.

De volgende vraag is hoe de reikwijdte afneemt als de warmtekaracteristieken uit zichzelf of als gevolg van de weersomstandigheden (regen) zwakker uitvallen. Ondanks de kunstmatige koeling vangen de sensors toch ook altijd nog een kleine hoeveelheid „stoor”warmte op uit het apparaat zelf. Van belang is nu de verhouding van de „beeld”warmte tot deze „stoor”warmte, de zg. signaal-ruisverhouding. In een aantal aanvullende experimenten werd de signaal-ruisverhouding gevarieerd en dan werd onderzocht hoe de herkenning daarvan afhangt. Net als bij de helderheidsversterkers kunnen ook in dit geval de resultaten worden geïnterpreteerd volgens een eenvoudig theoretisch model, dat kan worden gebruikt om de waarnemingsprestaties te voorspellen op grond van de ontwerpkenmerken. Praktisch gesproken kan worden gesteld dat goede warmtebeeldapparatuur primair door de lijndichtheid wordt begrensd, maar het is van belang nog eens te herhalen dat het warmteplaatje uit zichzelf



Afb. 5 Herkenningscore van een bepaalde verzameling van warmtebeelden als functie van het aantal lijnen waarmee de scène ter plaatse van het doel wordt afgetast

dikwijls moeilijk interpreteerbaar kan zijn. Wij noemden reeds de diffuse hete motorblokken. Daarbij komt het optreden van natuurlijke „hot spots” in het terrein, zoals door de zon beschenen onbegroeide stukken zand, die dan als „beeldruis” gaan optreden.

Tot dusverre bleven de herkenningsexperimenten in het laboratorium beperkt tot kunstmatige experimenten met nagebootste warmtebeelden. Dat maakt voor de visuele waarneming geen verschil. Als men echter warmtebeeldapparatuur op dezelfde manier aan herkenningsexperimenten wil onderwerpen als wij met HV-kijkers deden, zal het nodig zijn in het laboratorium ook de echte warmtestralingspatronen aan te bieden. Dat is zeer gewenst, want ook voor warmtebeeldapparatuur geldt dat veldexperimenten een slechte kosten-batenbalans hebben.

Beeldbewerkingstechnieken

De slag om het duister gaat verder. Men probeert de gevoeligheid van bestaande sensors te verbeteren. Men zoekt het ook in technieken als radar en sonar, die weliswaar in principe niets meer gemeen hebben met de visuele waarneming, maar waarmee objecten in het terrein wel kunnen worden gedetecteerd en dus ook zichtbaar gemaakt op een beeldscherm als men dat wenst. Wat het zichtbaar maken betreft gaat de aandacht thans sterk uit naar beeldbewerking met behulp van „special purpose”-computerschakelingen die in de apparatuur kunnen worden opgenomen. Het gaat inderdaad dan erom zodanige bewerkingen uit te voeren, dat de visuele waarneming wordt verbeterd.

Men kan aan verschillende mogelijkheden denken: gebruik van kleur, het ophalen van contrast-arme partijen, het „wegretoucheren” van storende beeldruis, en zelfs het markeren van mogelijke doelposities. Op het ogenblik concentreert het onderzoek van het IZF op dit gebied zich in het bijzonder op het samenvoegen in één beeld van beeldgegevens, afkomstig van twee of meer verschillende typen sensors. Dat heeft natuurlijk al-

leen zin als deze beeldgegevens elkaar aanvullen. Dit geldt tot op zekere hoogte voor helderheidsversterkers en warmtebeeldapparatuur, hoewel de laatste dan toch wel de dominerende component zal zijn.

Literatuur

A. van Meeteren — Visual contrast sensitivity with Ideal image intensifiers. *Optik* 37(1973)179-191.



Dringend verzoek aan auteurs

Steeds vaker bereiken de redactie bijdragen, getypt m.b.v. een tekstverwerker. Helaas wordt daarbij veelvuldig verzuimd rekening te houden met de noodzaak de tekst te typen met anderhalve of dubbele regelafstand. Derhalve hierbij het dringende verzoek aan auteurs, hun manuscript te verzorgen volgens de „Regels voor kopijverzorging”, die op gezette tijden achterin de Militaire Spectator worden afgedrukt (zie het recente oktobernummer).

Dat het wenselijk is van tijd tot tijd het lint in schrijfmachine of printer te vervangen, zou eigenlijk geen vermelding moeten behoeven.

Helaas worden ook in toenemende mate *illustraties* ingezonden die niet of nauwelijks geschikt zijn voor verkleining en reproductie. Ook in dit verband wordt met nadruk verwezen naar evengenoemde Regels, punt 2. Computertekeningen zijn slechts bruikbaar indien vervaardigd m.b.v. een speciaal tekenprogramma (bv. „Graphix”).

REDACTIE