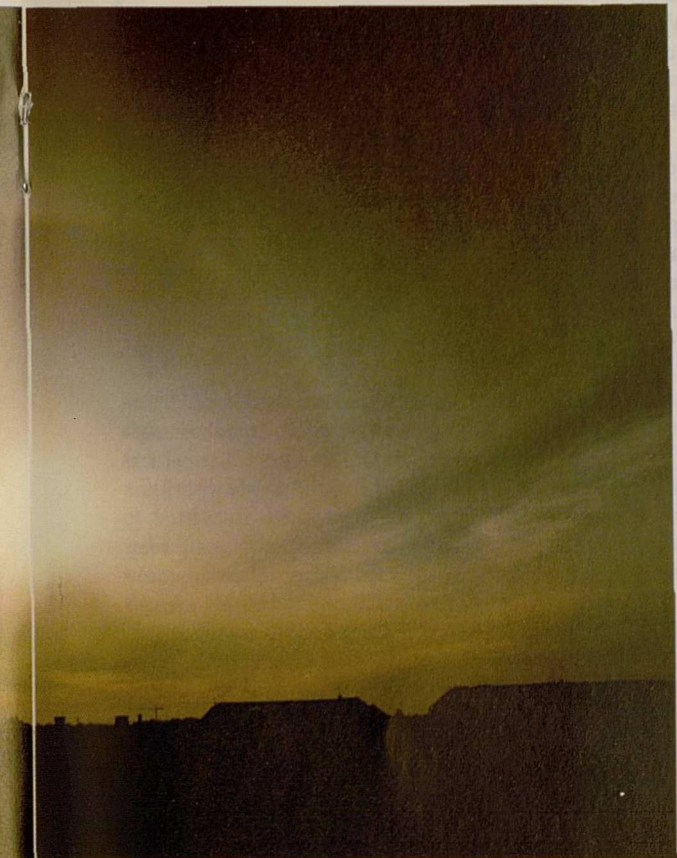


G.P. Können
KNMI, De Bilt

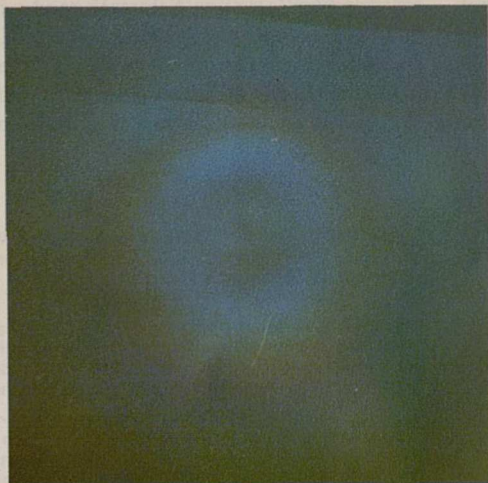


HET ONZICHTBARE LICHT

**Polarisatie
in de natuur**



Het menselijk oog is bijzonder gevoelig voor kleur en helderheid, maar polarisatie, de derde karakteristiek van licht, blijft voor ons vrijwel verborgen. Bij gebruik van een simpel polarisatiefilter (bijv. een polaroid-zonnebril) verandert dit en merken wij hoe veel polarisatie er om ons heen is. Het is dan ook een genoegen de wonderlijke wereld te verkennen die met zo'n filter opeens voor ons zichtbaar wordt en zijn merkwaardige effecten te ondergaan en te onderzoeken. In dit artikel zal globaal het polarisatiepatroon van de natuur aan de hand van een aantal voorbeelden worden beschreven en de achtergronden ervan toegelicht worden.



Een halo op 22 graden van de zon (links-boven). Dit verschijnsel verschuift enigszins als wij het met een polarisatiefilter bekijken.

De glorie is een soort aureool dat verschijnt rond onze schaduw, als deze op mist valt (links). Het is vaak vanuit een vliegtuig te zien. Deze foto is opgenomen door een polarisatiefilter, die een krakelingachtige structuur erin zichtbaar maakt (vergelijk de foto op pag. 361). De doorlaatrichting van het filter is met een pijltje aangegeven.

Licht wordt gekarakteriseerd door drie eigenschappen: *helderheid, kleur en polarisatie*. Fysisch is een lichtgolf dus pas gedefinieerd als *alle drie de karakteristieken bekend zijn*. Voor de mens ligt dat anders omdat het menselijk oog nu eenmaal wel erg gevoelig is voor helderheid en kleur, maar niet voor polarisatie; wij zijn dus 'polarisatieblind'.

Deze handicap delen wij met vele diersoorten, maar niet met allemaal. Bijen bijvoorbeeld kunnen polarisatie bijna even goed waarnemen als kleur of helderheid. Omdat er zoveel polarisatie aanwezig is, zien deze dieren dus een extra facet aan de lichtspelingen in de natuur dat het 'ongewapende' menselijk oog vrijwel geheel ontgaat.

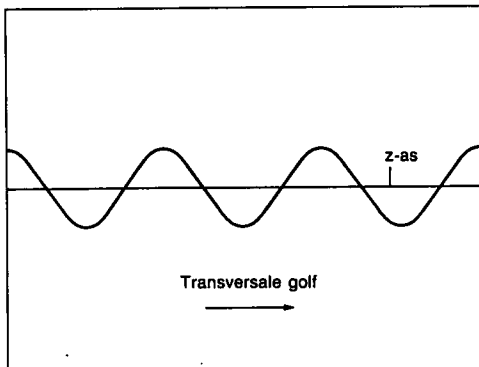
Wat is polarisatie?

Onbekend maakt onbemind. Als bij de polarisatieblinde mens het begrip polarisatie ter sprake wordt gebracht, dan is de reactie al gauw: "wat is dat". Bij kleur zou men zo'n vraag niet gauw stellen: groen is groen; dat dit te maken heeft met de golflengte van licht wordt in eerste instantie als bijzaak gezien. Maar polarisatie moet eerst uitgelegd worden voor het aan kan spreken.

Polarisatie heeft te maken met de oriëntatie van het trillingsvlak van de lichtgolven in de ruimte. Als 'de' trilling nemen wij de elektrische trilling van een golf. Het transversale karakter van lichtgolven schrijft voor dat, als een golf zich in de z-richting voortplant, de trillingen slechts plaats kunnen vinden loodrecht op de voortplantingsrichting, dus in het x-y vlak (zie fig. 1).

Een elementair lichtdeeltje (lichtkwant) bestaat uit een vlakke golf, zoals weergegeven in de figuur. De hier getekende golf trilt alleen in het vlak van het papier en niet loodrecht erop. Bij een andere lichtkwant zou deze trillingsrichting anders kunnen zijn. Nu bestaat een lichtbundel uit een enorme hoeveelheid lichtkwanten. Als in de bundel de trillingsrichting van de opeenvolgende kwanten telkens anders is, dan is de lichtbundel *ongepolariseerd*. In dit geval blijkt gemiddeld geen voorkeursrichting van de trillingen te zijn.

Indien er echter wél van zo'n gemiddelde voorkeur sprake is, dan is de bundel (lineair) gepolariseerd. In het uiterste geval trillen alle kwanten op precies dezelfde wijze; de polarisa-



tie is dan volledig. De sterkte van de polarisatie geeft men aan met een getal, de polarisatiegraad (zie intermezzo I). Deze polarisatiegraad geeft dus de mate aan waarin er een voorkeur in trillingsrichting aanwezig is.

De polarisatietoestand van licht geeft men ook wel aan met pijltjes. Deze stellen de voorkeursrichting van de trillingen voor als men in de voortplantingsrichting van het licht kijkt. Een ongepolariseerde lichtbundel kan men ook opvatten alsof die opgebouwd is uit twee gepolariseerde lichtstralen, die loodrecht op elkaar staan (zie fig. 2).

Een polarisatiefilter maakt ons ziende

Met behulp van een polarisatiefilter kunnen wij de polarisatie van licht wél goed waarnemen. Zulke filters, die onder andere in polaroid(anti-glans)-zonnebrillen zitten, laten namelijk maar één trillingsrichting van het licht door. Als wij door zo'n filter naar gepolari-

Boven: Fig. 1. Een lichtgolf is transversaal, wat wil zeggen dat hij alleen loodrecht op zijn voortplantingsrichting kan trillen. Deze is hier als de z-as aangegeven.

Rechts: Fig. 2. De polarisatietoestand van licht kan men eenvoudig weergeven met pijltjes. Hier is op schematische wijze de splitsing van een ongepolariseerde lichtbundel in twee gepolariseerde lichtstralen getekend.

Geheel rechts: Fig. 3. De vertaling van polarisatie in helderheid door een polarisatiefilter. De polarisatiegraad van het invallende licht is hier 90 procent. De hoek tussen de doorlaatricting van het filter en de voorkeursrichting van de lichttrillingen is α . De doorgelaten intensiteit is logaritmisch uitgezet, omdat dit het beste de responsie van het oog weergeeft.

Polarisatiegraad

De sterkte van de polarisatie wordt uitgedrukt met een getal, de polarisatiegraad P . Als I_1 de intensiteit in de voorkeursrichting van de trillingen van het licht is en I_2 de intensiteit van het licht met trillingen loodrecht hierop, dan is de polarisatiegraad

$$P = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \times 100\%$$

Als er dus drie keer meer licht in de voorkeursrichting trilt dan loodrecht hierop, dan is de polarisatiegraad 50 procent. Met een filter kan men polarisatie waarnemen als de polarisatiegraad meer dan zo'n 10 procent is; bij professionele apparatuur ligt deze grens ver onder 0,1 procent.

seerd licht kijken en het filter ronddraaien, dan verandert de helderheid van het doorgelaten licht (zie ook fig. 3). Bekijken wij op dezelfde wijze ongepolariseerd licht, dan gebeurt er natuurlijk niets.

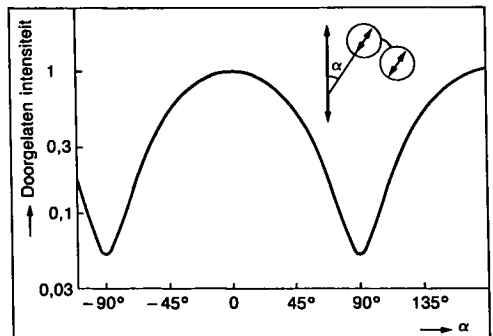
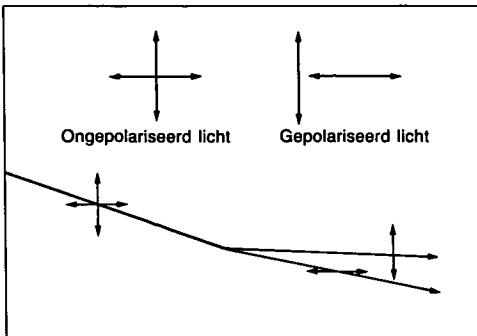
Een voorbeeld van sterke polarisatie is de blauwe hemel, vooral op zo'n 90° van de zon. Op de foto's op pag. 354-355 is te zien hoe men een bewolkte hemel daar verandert wanneer men een polarisatiefilter voor het oog houdt. Linksonder de hemel zonder filter. Op de foto in het midden wordt het hemellicht maximaal doorgelaten. Dit verschilt dan niet zo veel van wat wij met het ongewapende oog zien. Bij de rechter foto is het licht van de hemel maximaal uitgedoofd. Het verschil is verblijvend: door de verzwakking van het hemellicht slaat het contrast met de wolken helemaal om. Zoiets lukt echter alleen als men dwars op de zon kijkt, want elders aan de hemel is de polarisatie minder.

Dit verloop is het best te zien bij onbewolkt

weer, want door het filter zien wij dan dwars over de hemel een brede, donkere band verschijnen die het gebied van de sterkste polarisatie markeert. Deze is te zien op pag. 355 boven. Omdat deze band eigenlijk alleen maar bij één stand van het filter goed zichtbaar is, zegt men wel eens dat maximale uitdoving ons pas echt de 'gepolariseerde' wereld toont.

In feite is het verbazend dat zo'n simpel hulpmiddel als een polarisatiefilter de wereld een volkomen ander uiterlijk kan geven. Het is het gevolg van twee factoren: onze vrijwel absolute polarisatieblindheid en de grote hoeveelheid gepolariseerd licht om ons heen.

Zoals gezegd kunnen bijen wel polarisatie zien en maken er ook gebruik van. Wij moeten ons hierbij echter niet voorstellen, dat zij dezelfde donkere band aan de hemel zien die wij met zo'n filter waarnemen; zij zien echt 'iets anders'. Want de donkere band die wij zien is slechts het gevolg van de specifieke werking van het polarisatiefilter: deze 'vertaalt'



Waarnemen van polarisatie met het blote oog

Bij nadere beschouwing blijkt het menselijk oog toch niet helemaal polarisatieblind te zijn. Wij kunnen ongepolariseerd licht inderdaad onderscheiden van gepolariseerd licht, mits de polarisatiegraad minstens 50 procent is. Valt dit licht in het oog, dan zien wij namelijk een klein, gelig, krakelingvorming figuurtje in het midden van het blikveld verschijnen dat er bij ongepola-

riseerd licht niet is. De richting van dit figuurtje wordt bepaald door de trillingsrichting van het licht en de helderheid ervan door de sterkte van de polarisatie.

Er is dus werkelijk een groot verschil in de manier waarop polarisatie met het blote oog te zien is en de wijze waarop een filter het voor ons zichtbaar maakt. Men kan zich oefenen dit

voor ons polarisatie in intensiteit. Wij kunnen dus met het filter wel de aanwezigheid van polarisatie vaststellen, maar natuurlijk niet echt zichtbaar maken (zie intermezzo II).

Dit is te vergelijken met wat een absoluut kleurenblinde (die alleen maar zwart/wit ziet) kan doen met kleurenfilters: deze vertalen voor hem *kleur* in intensiteit. Als hij rondkijkt zal hij bijvoorbeeld merken dat met een blauwfilter de onbewolkte hemel helderder is dan met een roodfilter. Hieruit weet hij dat er kleur aanwezig is zonder die ooit als een normaal mens te kunnen zien. Maar de kleurenfilters tonen de kleurenblinde een andere zwart/wit wereld dan hij gewend is; hij ziet bijvoorbeeld met een roodfilter een opvallend extra contrast tussen een pioen en de blauwe hemel. Op dezelfde wijze zien wij met een polarisatiefilter een hoogstmerkwaaardige wereld verschijnen, omdat hierin echte intensiteitschakeringen en in intensiteit vertaalde polarisatie door elkaar heen lopen.

Wanneer wij met een polarisatiefilter naar sterk gepolariseerd licht kijken en het filter hierbij voor het oog ronddraaien, zullen we een variatie in de intensiteit waarnemen (zie fig. 3). De doorgelaten intensiteit is logaritmisch uitgezet, omdat dit, volgens de wet van Fechner, de respons van het oog op helderheid het beste weergeeft. De oorspronkelijke functie (een sinus) wordt dus omgezet in een kromme met flauwe maxima en scherpe minima.

Dit is dus de gewaarwording die wij ondergaan bij gebruik van een filter. De kromme maakt duidelijk dat er maar weinig gebeurt bij een kleine verdraaiing van het filter als de doorgelaten intensiteit groot is. Als de doorlating echter vrijwel minimaal is, dan heeft zo'n kleine verdraaiing een groot effect. Daarom zeggen we dat het filter ons alleen bij maximale uitdoving (doorlaatrichting van het filter loodrecht op de trillingsrichting van het licht) de gepolariseerde wereld toont die verder bij andere standen grotendeels onzichtbaar is.



figuurtje te zien door een polarisatiefilter voor het oog te houden en zo gepolariseerd licht te maken. Als men dan naar een egaal wit vlak staart, dan komt het figuurtje tevoorschijn en draait met het filter mee. Men noemt dit figuur naar zijn ontdekker 'bundels van Haidinger', die dit in 1844 waarnam.

Hoewel de blauwe hemel een fraai voorbeeld is van sterke polarisatie, is dit lang niet het bekendste voorbeeld van gepolariseerd licht in de natuur. Dit is de glans, zoals die bijvoorbeeld bij wateroppervlakken optreedt. Op de foto op de volgende pagina is dit effect gedemonstreerd: met een filter in de juiste stand kan men 'hinderlijke schitteringen' wegnemen. Een praktische toepassing is de polaroid-zonnebril waarin glazen zitten die ondoorzichtig zijn voor licht dat evenwijdig met de hori-



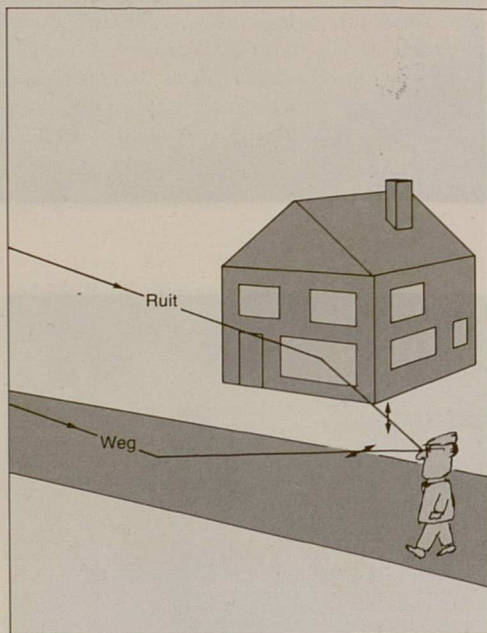
Het hemellicht is sterk gepolariseerd, vooral dwars op de zon. De foto's links tonen hoe het uiterlijk van een halfbewolkte lucht verandert bij gebruik van een polarisatiefilter. Van links naar rechts zien wij resp. de hemel zonder filter, met een filter in de stand van maximale doorlating en in de stand van minimale doorlating. De pijltjes geven de stand van het filter aan. Let op de contrastverandering wolken-lucht, die wordt veroorzaakt doordat wolken minder gepolariseerd zijn dan de hemel. Op de groothoekopname boven markeert de donkere band het gebied van de hemel met de sterkste polarisatie. Deze band ligt op ca. 90° van de zon die laag aan de hemel staat. De stand van het filter is horizontaal.

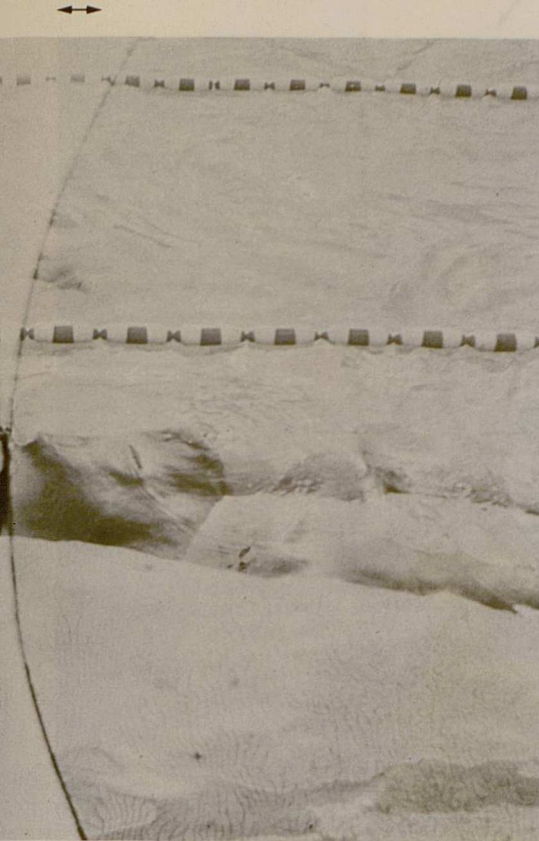
zon trilt. Omdat de polarisatie van weerkaatst licht evenwijdig is met het kaatsend oppervlak, verzwakt de bril de schittering op water. Maar bij ruiten, die meestal rechtop staan, werkt de bril averechts (zie fig. 4).

De polarisatie van glans kan bijzonder sterk zijn. Bij één bepaalde hoek van inval (dit wordt de zgn. Brewsterhoek genoemd) is de polarisatie zelfs volledig. Op de foto rechts is te zien wat er gebeurt als wij de glans met een filter uitdoven: een wateroppervlak wordt volkomen doorzichtig zodat we zowel de bodem van het zwembad als de zwemsters in het water veel beter kunnen zien.

Vrijwel al het licht om ons heen is weerkaatst (of bij de hemel verstrooid) zonlicht. De meeste voorwerpen in de natuur hebben echter een vrij ruw oppervlak en hebben in droge toestand vrijwel geen glans. Zulke oppervlakken kaatsen het zonlicht naar alle kanten toe; dit in tegenstelling tot gladde oppervlakken, die de glans maar in één richting kaatsen (volgens hoek van inval is hoek van kaatsing). Bij ruwe oppervlakken spreekt men van *diffuse* weerkaatsing. Maar ook het gekleurde, diffuus weerkaatste licht in de natuur is gepolariseerd. Hierbij geldt een wonderlijke wetmatigheid: hoe *donkerder* het oppervlak, des te *sterker* is de polarisatie. Een betonweg is dus veel minder sterk gepolariseerd dan een verse asfaltweg! Dit verband wordt de regel van Umov genoemd, die ontdekt is in 1905. Het geeft tevens weer dat de diffuse weerkaatsing van een nat oppervlak sterker gepolariseerd is dan van een droog oppervlak: het vertoont dan niet alleen meer glans, maar ook de eigen kleur is donkerder en intenser.

De polarisatie van diffuus weerkaatst licht is het sterkst als wij dwars op de zon kijken. Dit is ook zo bij de blauwe hemel zoals te zien is op de foto op pag. 355 midden. Blijkbaar leidt strooiing van zonlicht op luchtmoleculen en (diffuse) weerkaatsing op voorwerpen tot een vergelijkbaar polarisatiepatroon, waarbij slechts de maximaal mogelijke polarisatiegraad van geval tot geval verschilt. Omdat vrijwel al het licht dat tot ons komt verstrooid of weerkaatst zonlicht is, vertoont de polarisatie van het licht in de natuur een hoge mate van uniformiteit. Hierin onderscheiden de polarisatieschakeringen zich van de kleurschakeringen in de natuur.

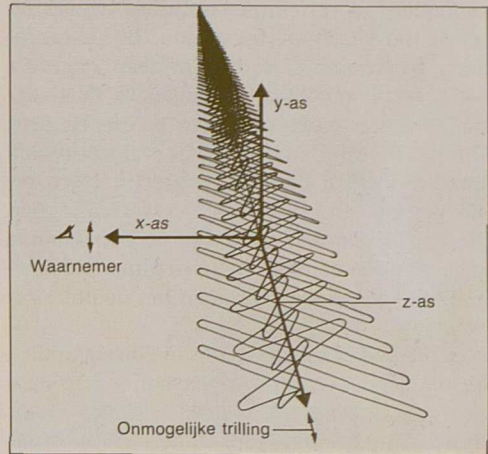




Links: Een zwembad, gezien door een polarisatiefilter. Als deze de juiste stand heeft, verdwijnt de glans op het water en worden de bodem en de zwemsters beter zichtbaar.

Linksonder: Fig. 4. De polarisatie-richting van glans is evenwijdig met het weerkaatsend oppervlak. Bij een rechtop staande ruit werkt een polaroidzonnebril dus averechts.

Onder: Fig. 5. Een lichtgolf is anisotroop, want als deze zich in de z-richting voortplant, zijn alleen trillingen in het x-y vlak mogelijk. Kijkt men dwars op de lichtstraal (bijv. in de x-richting), dan zien wij alleen in de y-richting trillingen. Verstrooid of weerkaatst licht is dus gepolariseerd.



Een uniform polarisatiebeeld

Dat het globale polarisatiepatroon van de natuur zo simpel is (symmetrisch rond de zon; maximaal op 90° ervan) doet vermoeden dat de verklaring ervan ook niet moeilijk moet zijn. Dat is ook zo. Het is namelijk onmiddellijk terug te voeren op de structuur van de ongepolariseerde lichtgolven die van de zon komen en voor de primaire belichting zorgen. Zoals in het begin van het artikel al gezegd is, trilt een lichtgolf alleen maar loodrecht op de voortplantingsrichting. Als wij z de voortplantingsrichting noemen, vinden de trillingen dus alleen in het x-y vlak plaats (zie fig. 5). Dit houdt echter in dat zelfs ongepolariseerd licht niet isotroop is: de trillingen in de z-richting ontbreken immers.

Als zo'n lichtgolf nu een deeltje treft, begint dit mee te trillen en zendt hierbij op zijn beurt ook licht uit. De trillingen van het deeltje komen echter overeen met die van de lichtgolf en

vinden dus eveneens slechts plaats in het x-y vlak. Dit betekent dat licht dat door het deeltje loodrecht op de oorspronkelijke lichtbundel wordt uitgezonden (bijv. in de x-richting) volledig gepolariseerd moet zijn. Ongepolariseerd licht zou namelijk in het y-z vlak moeten trillen, maar trillingen in de z-richting komen door het anisotrope karakter van het invallend licht nu eenmaal niet voor. Kortom: de anisotropie van lichtgolven leidt tot polarisatie van het doorgegeven licht.

Uit de figuur kan men afleiden dat de polarisatiegraad maximaal is voor licht dat een richtingsverandering van 90° heeft ondergaan, dus juist wat wij hiervoor al zagen. Voorts is de polarisatie-richting loodrecht op de verbindinglijn die men van de zon naar het kaatsend of strooiend deeltje zou kunnen trekken. Men spreekt dan ook wel van een *tangentiele* polarisatie(richting). Dit is inderdaad de polarisatie-richting van de blauwe hemel en van (diffuus) weerkaatst licht.

Niet al het licht in de natuur is echter te herleiden tot een simpele verstrooiing of tot een simpele (diffuse) weerkaatsing. Aan de hemel verschijnen namelijk van tijd tot tijd merkwaardige structuren, zoals regenbogen of halo's, die via andere mechanismen tot stand komen (zie fig. 6). Dit betekent ook dat hun polarisatie moet afwijken van het globale beeld dat hierboven werd geschetst.

Al deze ongewone verschijnselen zijn hoekgebonden: zij verschijnen altijd op vrijwel dezelfde (hoek)afstand tot de zon. Bij de regenboog bijvoorbeeld is deze afstand ongeveer 140° , zodat men met de rug naar de (laagstaande) zon moet staan om er een te zien. Omdat in de figuur ook de verschijnselen staan die wij al bespraken, geeft het een samenvatting van vrijwel alle lichtverschijnselen die wij bij aanwezigheid van de zon kunnen zien. Van een aantal is de ontstaanswijze schematisch aangegeven; dit dient om de polarisatie ervan te begrijpen.

In dit artikel zullen wij ons niet bezighouden met de details van al deze verschijnselen; deze zijn o.a. uiteengezet in twee artikelen in dit tijdschrift (C. Floor, juni en dec. 1979). Waar



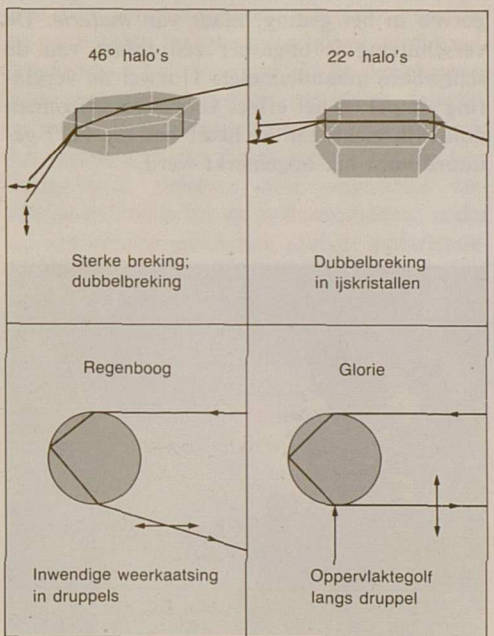
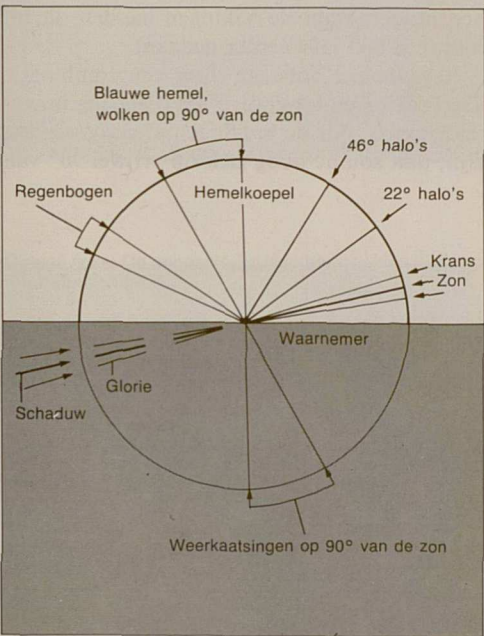
Boven: De circumzenitale boog is een levendig gekleurde halo op 46 graden boven de zon. Met een filter (hier verticaal) kan men hem iets uitdoven; hij verschuift dan tegelijk iets naar de zon toe.

Onder: Halo-vormen op 22 graden van de zon. Rond de zon is een deel van de kleine kring zichtbaar, erboven de bovenraakboog en links en rechts van de zon een bijzon. Ten gevolge van de dubbelbreking van ijs schuiven al deze verschijnselen heen en weer als men ze met polarisatiefilter bekijkt. Hier is het filter horizontaal gehouden.

Rechts: De regenboog is een van de sterkst gepolariseerde verschijnselen in de natuur. Met een filter in de juiste stand dooft het verschijnsel geheel uit.

Rechtsonder: Fig. 6. De positie van ongewone lichtverschijnselen aan de hemelkoepel. De ontstaansoorzaak van een aantal van deze is schematisch weergegeven. Ieder verschijnsel kent zijn eigen, karakteristieke polarisatie.





het ons hier om gaat is de polarisatie van deze wonderlijke lichteffecten. Deze behandelen wij nu aan de hand van figuur 6.

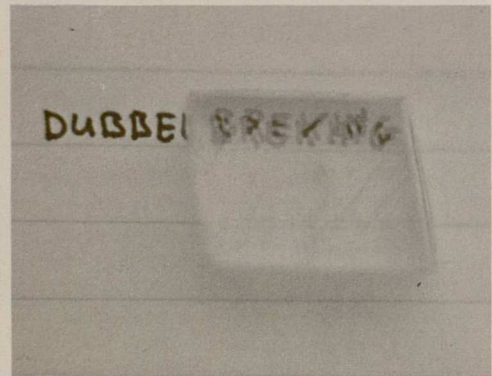
Kransen verschijnen als een gekleurde aureool dicht om de lichtbron (zie onder) en zijn uiterst lichtsterk. Rond de zon worden ze zelden opgemerkt, omdat men hiervoor vrijwel recht in de lichtbron moet kijken. Om de maan zijn ze echter gemakkelijk en vaak te zien. Zij ontstaan door buiging van licht aan wolkendeeltjes en zijn ongepolariseerd.

22° halo's. Dit is de verzamelnaam voor verschijnselen die zich op ongeveer 22° van de zon kunnen vormen. De foto op pag. 358 toont een aantal leden van deze halo-familie. Zij zijn bijna alleen in hoge, koude cirruswolken te zien, omdat zij door breking in ijskristalletjes ontstaan. Deze brekingen zelf wekken nauwelijks polarisatie op. Echter, ijskristalletjes zijn anisotroop, hetgeen wil zeggen dat hun eigenschappen niet in alle richtingen hetzelfde zijn. Een gevolg hiervan is dat licht met een andere polarisatierichting iets anders gebroken wordt (dubbelbreking heet dat, zie de foto rechtsonder). Halo's bestaan hierdoor uit twee verschillende componenten die iets ten opzichte van elkaar verschoven zijn. Met een polarisatiefilter kan men naar keuze de ene of andere component zien. Het verschijnsel dooft dus niet uit, maar schuift heen en weer. Hier is het dus niet de anisotropie van *golven* in het geding, maar van *materie*. De verschuiving is ongeveer één kwart van de schijnbare maandiameter. Hoewel de verklaring simpel en het effect vooral bij bijzonnen duidelijk zichtbaar is, heeft het tot 1977 geduurd voor het opgemerkt werd.

46° halo's. Een voorbeeld hiervan is afgebeeld op pag. 358 boven (let op de grote kleurenrijkdom). Deze halo's ontstaan eveneens door breking van licht in ijskristallen. De brekingen zijn echter sterker dan bij de 22° halo's, waardoor er merkbare polarisatie optreedt. Polarisatie door breking is tegengesteld aan polarisatie door weerkaatsing, zodat de richting evenwijdig is met de verbindingslijn halo-zon (dit noemt men wel *radiële* polarisatierichting). Men kan de halo duidelijk iets uitdoven met een polarisatiefilter, maar het effect wordt wat geflatteerd doordat de hemelachtergrond tegengesteld gepolariseerd is. Daarnaast schuift ook deze halo heen en weer ten gevolge van de dubbelbreking van ijs; dit is echter alleen bij de allerhelderste halo's goed te zien. Pas in 1980 is dit dan ook voor het eerst gezien.

Blauwe lucht, wolken, weerkaatsingen. De polarisatie hiervan kwam hierboven al ter sprake. Zoals de foto's op pag. 354-355 ons al lieten zien, zijn wolken minder sterk gepolariseerd dan de blauwe lucht. De polarisatie van *glans* werd in 1808 ontdekt door Malus. Hiervoor was nauwelijks iets bekend van polarisatie. Deze ontdekking gaf de stoot tot een uitgebreide jacht naar polarisatie en leidde in korte tijd tot een groot aantal vondsten. Zo werd reeds het jaar erna door Arago de polarisatie van het hemellicht ontdekt, of liever gezegd herontdekt, want de Vikingen hadden dit bij toeval al 800 jaar eerder gedaan!

Regenbogen ontstaan door een combinatie van breking en inwendige weerkaatsing in waterdruppels. Als de brekingen afwezig zouden zijn, dan zou de boog zich op vrijwel 90° van





de zon vormen. Regenbogen zijn dan ook bijzonder sterk gepolariseerd (zie de foto op pag. 359). De brekingen zorgen echter voor een richtingsverandering in de lichtstralen, waardoor dit sterk gepolariseerde verschijnsel op ongeveer 140° van de zon terecht komt. Het is een van de spectaculairste voorbeelden van gepolariseerd licht in de natuur, omdat men met een filter de regenboog *geheel* kan uitdoven. Dit is het eerst gezien in 1811.

De *glorie* wordt zichtbaar als onze schaduw op mist valt. Het bestaat uit een fraai aureool dat zich rond de schaduw van het hoofd vormt (zie de foto links). Het verschijnsel is vaak vanuit vliegtuigen als een soort klein 'regenboogje' te zien. De glorie is eveneens gepolariseerd; nabij het centrum tangentieel, verder hiervandaan radieel. Met een polarisatiefilter zien wij dus een structuur in dit kleine aureool verschijnen, die met het filter meedraait (zie de foto op pag. 351). Bij de vorming van de glorie spelen oppervlaktegolven een belangrijke rol, dat wil zeggen gepolariseerde lichtgolven die een eindje het gekromde oppervlak van de wolkendruppeltjes volgen. De polarisatie van de glorie is ontdekt in 1884, maar de volledige verklaring ervan is zó gecompliceerd, dat deze pas de afgelopen 30 jaar bij stukjes en beetjes ontwikkeld kon worden.

Al met al geeft het bovenstaande een enorme verscheidenheid weer in polarisatie-effecten: ieder verschijnsel kent zijn eigen, specifieke polarisatie. De ongewone hemelverschijnselen behoren ook hierdoor tot de dankbaarste waarnemingsobjecten en verdienen feitelijk meer dan zo'n beknopte beschrijving. Maar in het algemene beeld van de natuur dat wij hier behandelen, behoren deze ongewone verschijnselen toch tot de zeldzaamheden, zodat zij het ervoor geschetste globale polarisatiebeeld niet werkelijk kunnen verstoren.

Bovendien zien wij bij nadere beschouwing ook bij deze verschijnselen een duidelijke systematiek in de polarisatie, want de *richting* ervan is altijd of tangentieel of radieel ten opzichte van de zon, maar nooit anders. De ongewone verschijnselen brengen dus wel variatie in het polarisatiebeeld, maar hebben hierbij wel altijd een symmetrisch polarisatiepatroon ten opzichte van de lichtbron. Blijkbaar is deze *symmetrie een wezenlijk kenmerk van licht dat ons via de eenvoudigste omweg (lichtbron-voorwerp-waarnemer) bereikt.*

Geheel links: De ongepolariseerde krans vormt zich vlak rond een lichtbron.

Links: Calciet ('dronkemansglas') is veel sterker dubbelbrekend dan ijs. Door dit mineraal zien wij alles dubbel. De beide doorgelaten beelden zijn tegengesteld gepolariseerd. Met een polarisatiefilter kan men, net als bij halo's, het beeld heen en weer schuiven.

Boven: De glorie via een verticaal filter rond de schaduw van het mandje van een luchtballon. Met een polarisatiefilter wordt er een structuur in de glorie zichtbaar, die met het filter mee draait. Deze structuur is te zien op de foto op pag. 351.

Ordering van licht en polarisatie

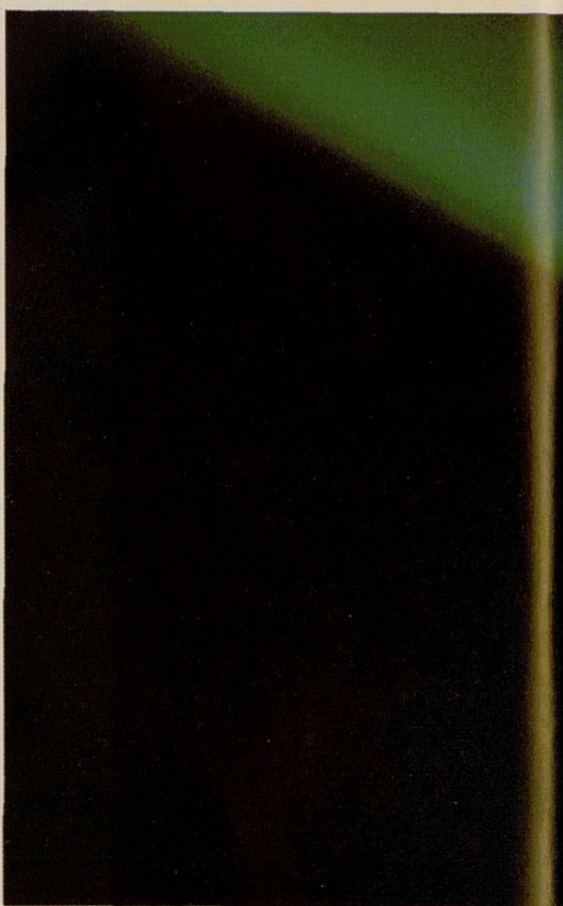
Een dergelijke symmetrie geldt echter niet voor λ het licht in de natuur. Wij hebben immers ook te maken met licht dat via een andere weg dan een enkelvoudige weerkaatsing of verstrooiing naar ons toe is gekomen. Natuurlijk is de polarisatie van zulk licht anders.

Men kan voor de eenvoud licht het beste indelen in drie bijdragen, namelijk licht dat *direct* van de lichtbron naar ons toe gaat, licht dat dit via *één* voorwerp doet en licht dat een omweg maakt via *meerdere* voorwerpen. Dit vertegenwoordigt dus een rangschikking van helder naar zwak. De polarisatie van deze bijdragen is als volgt.

Lichtbronnen (de zon, vuur, bliksem, enz.) zijn ongepolariseerd, omdat het licht afkomstig is van deeltjes met een hoge temperatuur die dus chaotisch bewegen.

Licht dat een omvang via *één voorwerp* maakt wordt hierbij meestal flink afgezwakt. Omdat er zoveel objecten in de natuur aanwezig zijn die zo'n omweg mogelijk maken, is dit toch de belangrijkste bijdrage tot het licht in het vrije veld. Zoals wij in het voorafgaande zagen, vertoont dit licht een symmetrische polarisatie ten opzichte van de lichtbron, waarbij de overheersende polarisatierichting tangenteel is.

Licht dat via *meerdere voorwerpen* het oog

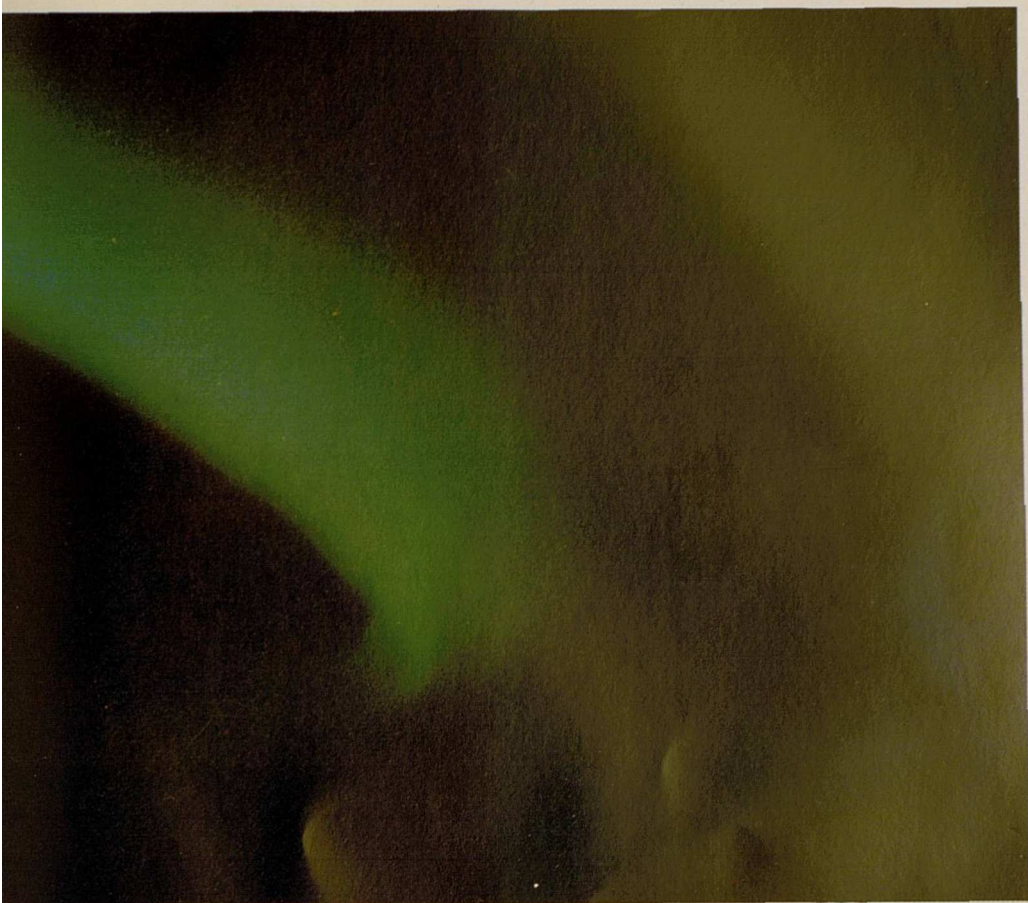


Onder: De gouden tor heeft een groenachtige metaalglans over zijn lichaam, die volledig *circulair* gepolariseerd is. Links gezien door een linksdraaiend circulair polarisatiefilter; dit verschilt niet veel van wat wij met het blote oog zien. Rechts door een rechtsdraaiend filter; de groene glans is nu weg. De witte schittering blijft onveranderd zichtbaar, omdat deze *lineair* gepolariseerd is. Kevers met deze optische eigenschap vormen een unieke uitzondering in de natuur.

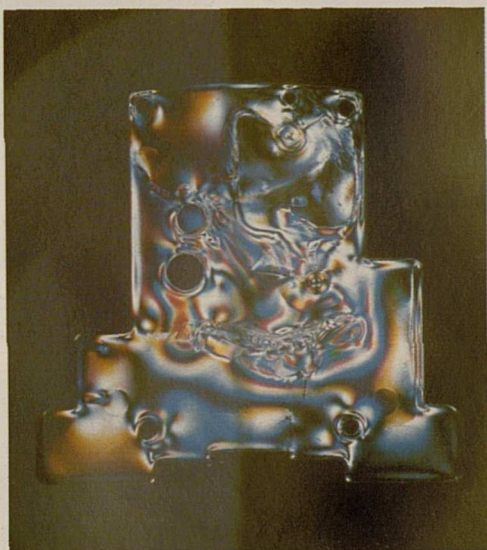
Boven: Het poollicht behoort tot de weinige gepolariseerde lichtbronnen in de natuur. Het hier afgebeelde groene poollicht is niet gepolariseerd, maar het rode poollicht, dat op grotere hoogte verschijnt, is wel gepolariseerd.

Rechts: Mechanische spanningen veranderen de polarisatie van doorvallend licht. Op plaatsen waar deze spanningen aanwezig zijn verschijnen kleuren. Hetzelfde zien wij vaak met een polaroidbril in autoruiten verschijnen.





bereikt is nog zwakker. Dit licht is bovendien door alle weerkaatsingen en dergelijke die het heeft ondergaan, zijn oorsprong min of meer 'vergeten', terwijl zijn polarisatie onderweg soms drastisch is veranderd. Een symmetrisch polarisatiepatroon is dus afwezig; de polarisatie die optreedt hangt zeer sterk af van de weg die het licht heeft afgelegd. Merkwaardig hierbij is dat door de omzettingen soms *circulair* gepolariseerd licht ontstaat, een vorm van polarisatie die wij nog niet eerder tegenkwamen. Circulaire polarisatie komt er op neer dat de lichtgolf als een soort schroef door de ruimte gaat. Men onderscheidt twee vormen: links- en rechtsdraaiend. Voor het waarnemen heeft men speciale filters nodig die het vermogen hebben slechts één draairichting door te laten. Circulaire polarisatie is zeer zeldzaam in de natuur.

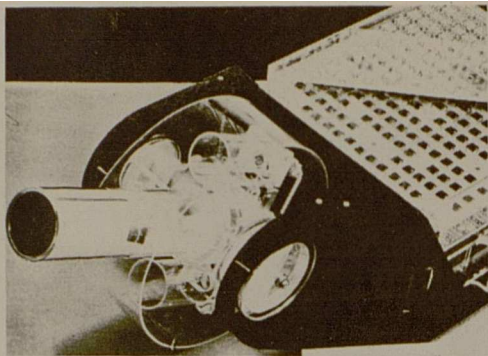


Buitenissige polarisatie

De tabel hieronder vat de karakteristieken van de drie bijdragen tot het licht in de natuur kort samen en geeft hiermee een soort hiërarchie aan in helderheid en polarisatie, waaraan vrijwel alle lichtverschijnselen voldoen.

In zeer uitzonderlijke gevallen kan het echter voorkomen dat van deze hiërarchie belangrijk wordt afgeweken. Zo zijn er enkele lichtbronnen in de natuur te vinden die wel degelijk sterk gepolariseerd zijn. Een beroemd voorbeeld is de Krabnevel in het sterrenbeeld de Stier, waar sprake is van synchrotronstraling (zie de foto's hieronder). Ook onderdelen van het poollicht zijn gepolariseerd, evenals de gloed van schone, heetgestookte metaaloppervlakken.

Maar nog merkwaardiger is een andere afwijking, waarbij ongepolariseerd licht door een enkelvoudige weerkaatsing direct wordt omgezet in circulair gepolariseerd licht. In de natuur kunnen alleen bepaalde keversoorten



Boven: Deze moderne polarimeter is door Pioneer-ruimteschepen langs Jupiter en Saturnus gevoerd en heeft daar met veel succes metingen aan deze planeten en hun satellieten verricht.

Onder: De Krabnevel behoort tot de zeldzame gepolariseerde lichtbronnen aan de sterrenhemel. Het uitgezonden licht is geen verstrooid licht, maar synchrotronstraling dat plaatselijk tot 70 procent gepolariseerd is. De polarisatie-richting verschilt van plaats tot plaats, zodat zijn vorm verandert bij gebruik van een polarisatiefilter.



TABEL Eigenschappen van de drie bijdragen aan licht in de natuur.

	Intensiteit	Polarisatie
Lichtbronnen	Helder	Afwezig
Enkelvoudig weerkaatst of verstrooid licht	Zwakker	Symmetrisch rond bron, meestal tangentieel
Meervoudig weerkaatst of verstrooid licht	Zwakst	Afwijkende polarisatie-richtingen; circulaire polarisatie

dit; zij vertonen een metaalachtige glans over hun lichaam die volledig circulair gepolariseerd is. Kevers met deze unieke eigenschap behoren alle tot de familie der Scarabaeidae. De draairichting van de polarisatie is altijd linksom. Met een rechtsdraaiend circulair polarisatiefilter verdwijnt de glans en is de kever donker (zie de foto's op pag. 362). Zulke kevers onderscheiden zich hierin van alle andere diersoorten. De biologische functie van dit merkwaardige fenomeen (zo die noodzakelijk is) is volledig onduidelijk.

Moderne polarimetrie

Zoals in het begin van dit artikel gesteld werd, staat polarisatie op één lijn met kleur (en helderheid) als eigenschap van licht. De polarisatie- en kleurtoestand van licht worden echter meestal door andere factoren bepaald, zodat de polarisatie informatie kan bevatten die men uit spectrale analyses niet of nauwelijks kan afleiden. De afgelopen jaren heeft men dan

ook zeer gevoelige polarimeters ontwikkeld die met veel succes in de astronomie zijn toegepast; in veel gevallen behoort een polarimeter tot de standaarduitrusting van interplanetaire ruimteschepen.

Een ander toepassing is het onderzoek aan mineralen en materialen: uit de wijze waarop deze de polarisatie van doervallend licht veranderen, kan men informatie verkrijgen over de kristallijne opbouw of mechanische spanningen (zwakke plekken) in materialen opsporen. Met dit verschijnsel worden wij in het dagelijks leven geconfronteerd als wij met een polaroid-zonnebril achter het stuur zitten en vlekken in de autoruit zien, die de plaatsen van mechanische spanningen in de ruit markeren. Toepassingen als deze vinden op ruime schaal in de industrie plaats.

Des te merkwaardiger is het dat maar zo weinig mensen weten dat de vrije natuur zelf ook al zoveel polarisatie bevat, met als de meest spectaculaire voorbeelden weerkaatsingen, de blauwe lucht en regenbogen.



Literatuur

Können, G.P., (1980). *Gepolariseerd licht in de natuur*. Thieme, Zutphen. ISBN 90 03 95930 7.

Bronvermelding illustraties

P.P. Hattinga Verschure, Deventer: pag. 350.
Alistair B. Fraser, Dept. of Meteorology, Pennsylvania State University: pag. 351, 359.
G.P. Können, Soest: pag. 354-355 onder, 355, 360 rechts, 362 onder.

Polaroid Nederland, Maarssen: pag. 356-357.
K.P. Bijleveld, Amersfoort: pag. 358 boven.
Cees Floor, De Bilt: pag. 358 onder, 360 links.
A.G.F. Kip, Zwolle: pag. 361 boven.
C.W. van Vliet, Hilversum: pag. 362-363.
Siemens AG, München: pag. 363 onder.
Lunar and Planetary Lab., University of Arizona, Tucson, USA: pag. 364 boven.
Mount Wilson and Palomar Observatories: pag. 364-365.