

dr. G. P. Können

GEPOLARISEERD LICHT IN DE NATUUR

GEPOLARISEERD

LICHT

IN DE NATUUR

Foto's omslag:

Voorzijde, boven: N. F. Verster
Achterzijde: M. A. Posthumus

Foto's: G. P. Können, tenzij anders vermeld.

Tekeningen: Geert Westerhof
Layout + omslag: Albert Aalbers
Lithografie: Studio Expres, Zutphen
Zet- druk- en bindwerk: Thieme, Zutphen

© B.V. W. J. Thieme & Cie - Zutphen

*Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd
en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotocopie, microfilm of op welke wijze ook,
zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.*

ISBN 90 03 95930 7

GEPOLARISEERD
LICHT
IN DE NATUUR

*door dr. G. P. KÖNNEN,
K.N.M.I., de Bilt*



Het polarisatiefilter in dit boek is welwillend afgestaan door:
Polarizers Ltd Nederland
Oudegracht 90
1811 KM Alkmaar
tel.: 072-121553
Praktisch alle polarisatieverschijnselen die in dit boek beschreven worden, zijn met het
bijgesloten filter of een polarisatiezonnenbril waarneembaar.

Inhoud

Voorwoord	8
Deel I Gepolariseerd en ongepolariseerd licht: het waarnemen	
<i>Soorten gepolariseerd licht</i>	
1 Gepolariseerd en ongepolariseerd licht	11
2 Lineair gepolariseerd licht en circulair gepolariseerd licht	12
3 Gedeeltelijk gepolariseerd licht en polarisatiegraad	14
4 Polarisatierichting, definities	15
5 Polarisatie van licht: waarom komt dit zo vaak voor?	16
<i>Het waarnemen van gepolariseerd licht</i>	
6 Met het blote oog	18
7 Waarnemen met filters	19
8 Minimaal waarneembare polarisatiegraad	22
9 Laveren met licht: een proefje met drie polarisatiefilters	23
10 De geschiedenis van de ontdekking van polarisatie	24
Deel II Gepolariseerde lichtverschijnselen in de natuur	
<i>Licht en belichting, kleur en polarisatie van de natuur om ons heen: een overzicht</i>	
11 Licht, kleur en polarisatie	29
<i>De blauwe lucht en de wolken</i>	
12 De blauwe hemel	32
13 Heiigheid aan de horizon: kleureffecten met polaroid	34
14 Schemering en negatieve polarisatie	34
15 Het waarnemen van de hemelpolarisatie <i>zonder filters</i>	35
16 Halfbewolkte lucht en voorwerpen in de lucht: polarisatiecontrasten	36
17 De zichtbaarheid van sterren en planeten overdag	38
18 De hemel bij maanlicht	38
19 Totale zonsverduistering	39
20 De polarisatie van wolken, overzicht	41
21 IJswolken en waterwolken	41
22 Polarisatiecontrasten tussen ijs- en waterwolken. Stof-, zandwolken en rook ..	42
23 Wolkenpolarisatie en negatieve wolkenpolarisatie bij schemering	42
24 Zware bewolking	43
25 Lichtende nachtwolken en parelmoerwolken	43
<i>Regenbogen, kransen, halo's, glories en aanverwante verschijnselen</i>	
26 Inleiding: de optische verschijnselen aan de hemel	45
27 Regenbogen	46
28 De lucht nabij regenbogen	47
29 Spiegelbogen en abnormale regenbogen	50
30 Mistbogen en wolkenbogen	51
31 Overtallige mistbogen	53
32 Dertiende regenboog?	54
33 Halo's, verschijningsvorm	55
34 Halo's, ontstaanswijze	56
35 Polarisatieeffecten bij halo's: globaal overzicht	59
36 Polarisatie van bijzonnèn, kringen en bogen op 22° van de zon	61
37 Halo's op 46° van de zon	62
38 Kringen en raakbogen met afwijkende zonsafstand	63

39	Reflectiehalo's	63
40	Halo's op beslagen ruiten	64
41	Kunstmatige halo's	64
42	De glorie	65
43	De krans, de heiligen schijn en iriserende wolken	66
<i>Het landschap en voorwerpen om ons heen</i>		
44	Inleiding: een globaal overzicht	69
45	Vlakten	70
46	Wegen en luchtspiegelingen	72
47	Papier, matglas, huizen, stenen en bergen	73
48	Onze auto	74
49	Planten, dieren en mensen	77
50	De circulaire gepolariseerde glans van bepaalde kevers	77
51	Glazen voorwerpen, ruiten, diamant, kwarts en andere doorzichtige stoffen	78
52	Autoruiten en andere dubbelbrekende glazen	81
53	Ijsbloemen, ijsschilfers en plastic: kleurverschijnselen in gepolariseerd licht. Diademonstraties met cellofaan	84
54	Watervlakten: plassen, meren, de zee en de oceaan	86
55	De blauwe diepzee	87
56	De wereld onder water	88
<i>Nachtelijke lichtbronnen en kunstlicht</i>		
57	Inleiding: het uiterlijk van de wereld bij nacht	91
58	Sterren, planeten en andere hemellichamen	93
59	Poollicht	94
60	Het zodiakale licht, de Gegenschein en het ionosfeerlicht	96
61	Lichtende zee, hout, vuurvliegjes en dergelijke	98
62	Gloeiende voorwerpen, vuur, vonken en bliksem	99
63	Lichtbronnen en licht in een nachtelijke stad	102
64	Kunstmatige lichtbronnen zoals lampen, horlogeplaten, TL en TV buizen	102
<i>Kleurverschijnselen bij mineralen in gepolariseerd licht</i>		
65	Inleiding	106
66	Wijze van waarnemen	107
67	Eénassige mineralen als calciet	107
68	Tweeassige mineralen als aragoniet	109
69	Optische activiteit in suikeroplossingen en mineralen als kwarts	110
70	Pleochroite mineralen als glaucofaan, toermalijn en epidoot. Bundels van Brewster en idiofanische ringen	113

Deel III Het ontstaan van gepolariseerd licht in de natuur

Inleiding

71	Algemeen overzicht	117
<i>Het ontstaan van gepolariseerd licht uit ongepolariseerd licht</i>		
72	Polarisatie door weerkaatsing en strooien: algemene beschouwing	118
73	Strooien aan kleine deeltjes en grote deeltjes	119
74	Uitwendige weerkaatsing op niet-metalen	120
75	Inwendige weerkaatsing op niet-metalen. Totale reflectie	121
76	Metallicaire reflectie	122
77	Weerkaatsing op ruwe oppervlakten	122
78	Gepolariseerd licht door strooien en weerkaatsing: conclusie	123
79	Breking aan niet-metalen	123

80 Breking aan metalen: emissiepolarisatie	124
81 Oppervlaktegolven	125
82 Optisch actieve metaalglans	125
83 Polarisatie door dubbelbreking	126
84 Polarisatie door selectieve absorptie (dichroisme en trichoisme)	127
<i>Het veranderen van de toestand van polarisatie door weerkaatsing e.d.</i>	
85 Inleiding	129
86 Strooien van gepolariseerd licht en meervoudige strooien	129
87 Weerkaatsing van lineair licht op gladde niet-metalen	130
88 Weerkaatsing van circulair licht op gladde niet-metalen	132
89 Weerkaatsing van lineair licht op ruwe oppervlakken	132
90 Totale reflectie van gepolariseerd licht	133
91 Weerkaatsing van gepolariseerd licht op metallische oppervlakken	133
92 Breking, dubbelbreking en optische rotatie van gepolariseerd licht: kleurverschijnselen in gepolariseerd licht, een overzicht	134
93 Chromatische polarisatie	136
94 Kristaloptica (optische mineralogie)	139
95 Optische rotatie	140
<i>Bronnen van gepolariseerd licht</i>	
96 Inleiding	142
97 Elektrische ontladingen en Zeeman-effect	142
98 Synchrotronstraling	143
<i>Slot en overzicht</i>	
99 Gepolariseerd licht in de natuur: een fysisch overzicht	144
<i>Literatuur</i>	
Alfabetisch register	148

Voorwoord

Licht wordt gekenmerkt door drie eigenschappen: helderheid, kleur en polarisatie. De eerste twee zijn bepalend voor de wijze waarop de wereld op ons overkomt: het oog is buiten gewoon gevoelig voor kleurnuances en helderheidsverschillen. Met polarisatie is dit anders, omdat wij nauwelijks in staat zijn dit met het blote oog vast te stellen. Met de hulp van een polarisatiefiltertje, zoals die zich bijvoorbeeld in zonnebrillen bevinden, verandert dit; men bemerkt dan opeens hoeveel gepolariseerd licht er wel is. De wereld van het gepolariseerde licht verschilt op een wonderlijke wijze van die zonder zo'n filter: terwijl sommige objecten nauwelijks een verandering ondergaan, blijken andere volkomen anders op ons over te komen.

Het onderwerp van dit boek is tweeledig. Enerzijds beoogt het een natuurgids te zijn voor de kleur- en lichtverschijnselen om ons heen, en anderzijds is het speciaal toegespitst op de polarisatie ervan. Bijna alles wat ter sprake komt kan men met een simpel filtertje, zonder verdere hulpmiddelen te zien krijgen.

Voor zover ons bekend is dit een eerste poging om een polarisatiegids samen te stellen: de literatuur over dit onderwerp is zeer verspreid en ook niet altijd volledig. Dit maakte het noodzakelijk eigen waarnemingen in het veld te gaan verrichten; inderdaad is zo'n 90% van de behandelde effecten door de auteur zelf gezien. Eens te meer bleek hierbij hoe weinig aandacht er aan dit onderwerp is besteed, en dat er toch zeer opvallende polarisatieeffecten bestaan (speciaal bij halo's) die blijkbaar nooit eerder zijn gezien.

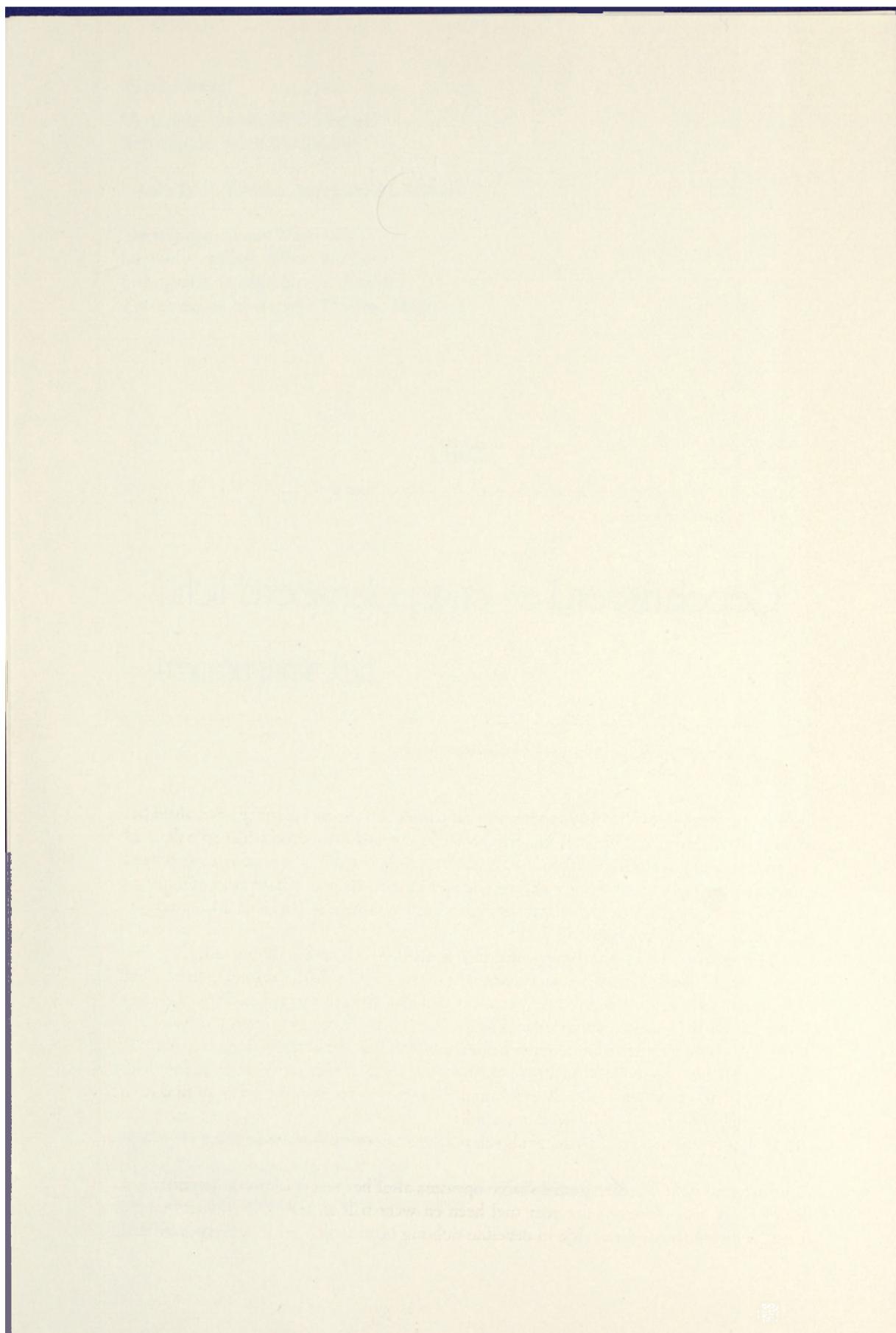
De indeling van dit boek is als volgt. In deel I wordt een algemene beschouwing over polarisatie en het waarnemen ervan gegeven. Deel II is de eigenlijke natuurgids: hierbij wapenen wij ons met een polarisatiefilter om ook dit aspect van de spelingen van het licht te kunnen zien aan de hemel, op de grond en in een nachtelijke omgeving. Speciale aandacht is gegeven aan de prachtige, gekleurde optische verschijnselen aan de hemel, die ondanks hun veelvuldig verschijnen helaas maar door weinigen opgemerkt worden, en waarvan de polarisatieeffecten nog minder waargenomen zijn. Het deel wordt gesloten met een overzicht van de kleurpatronen die bij mineralen in gepolariseerd licht verschijnen. In deel III tenslotte, wordt het ontstaan van gepolariseerd licht door verschillende oorzaken aanschouwelijk beschreven, zodat de lezer zich een voorstelling kan maken welke processen er nu wel, en welke er geen gepolariseerd licht opleveren. Hierbij is bewust gekozen voor een zo simpel mogelijke aanpak als aanvulling op de bestaande literatuur hierover. Dit deel wordt gesloten met een hoofdstuk waarin het algemene beeld van de polarisatieverschijnselen in de natuur wordt weergegeven en aan de hand van eenvoudige symmetrieregels wordt verklaard.

Speciale dank ben ik verschuldigd aan mijn broer, drs E. E. Können voor de bijzonder consciëntieuze wijze waarop hij het manuscript heeft doorgenomen en voor de vele waardevolle suggesties die hiervan het gevolg waren. Verder dank ik drs. J. Wevers voor haar steun op het gebied van de optische mineralogie en tenslotte al diegenen die hun fotomateriaal ter beschikking hebben gesteld of anderszins hun steun hebben gegeven.

voorjaar 1980.

Deel I

Gepolariseerd en ongepolariseerd licht:
het waarnemen



Soorten gepolariseerd licht

1 Gepolariseerd licht en ongepolariseerd licht

Licht is een *golf* van elektromagnetische aard. Een dergelijke golf trilt altijd loodrecht op zijn voortplantingsrichting (fig. 1).

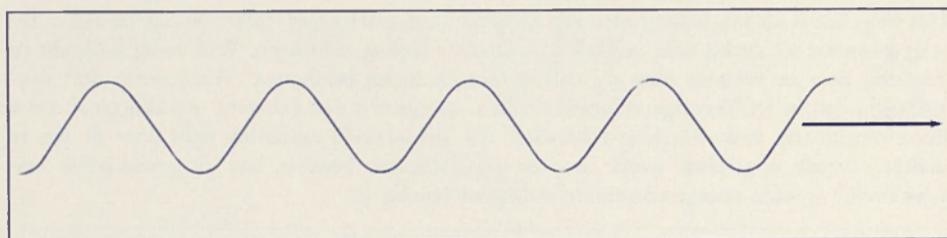


fig. 1 *Een lichtgolf trilt loodrecht op zijn voortplantingsrichting.*

De hier getekende golf trilt in het vlak van dit papier. Dit hoeft natuurlijk niet altijd het geval te zijn; een dergelijke golf kan bijvoorbeeld evengoed loodrecht hierop trillen, of een andere trillingsrichting hebben. Licht, dat bijvoorbeeld van de zon afkomstig is heeft geen speciale voorkeur voor de richting waarin het trilt, en hier wisselt het trillingsvlak van het licht dan ook vele malen per seconde. Licht waarbij dit het geval is heet *ongepolariseerd licht*, of kortweg *natuurlijk licht*.

Het blijkt echter, dat er ook licht is waarbij de trillingen in één vlak blijven, dus zoals hierboven getekend. Zulk licht heet (*lineair*) *gepolariseerd licht*. Ook deze soort licht komt in de natuur voor, en het is deze speciale vorm van licht waar wij in dit boek over schrijven. Ons oog is nauwelijks gevoelig voor de polarisatie van het licht, zodat wij ons doorgaans met een filtertje moeten behelpen om polarisatieeffecten te kunnen zien. Zo gevoelig als het oog is voor kleurschakeringen, zo ongevoelig is het voor polarisatieverschijnselen: in analogie met kleurenblindheid kan men het oog opvatten als praktisch 'polarisatieblind' te zijn. Des te verrassender zijn dan ook de effecten die men in de natuur met een polarisatiefiltertje, zoals een polaroidzonnebril, kan waarnemen.

Gepolariseerd licht kan men gemakshalve opvatten alsof het wordt uitgezonden door een deeltje (bijv. een elektron) dat zeer snel heen en weer trilt en ten gevolge hiervan een lichtgolf uitzent. Als dit deeltje in dezelfde richting blijft trillen zendt het gepolariseerd

licht uit. Trilt het echter steeds in een andere richting, dan wisselt het polarisatievlak voortdurend en hebben wij dus te doen met ongepolariseerd licht (fig. 2).

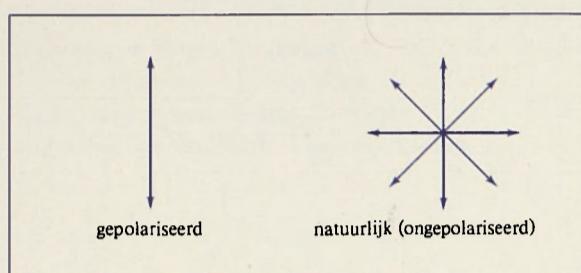


fig. 2 Lichttrillingen bij gepolariseerd en natuurlijk (ongepolariseerd) licht.

Lineair gepolariseerd licht wordt dus gekarakteriseerd door een *richting*, zoals de kleur van het licht wordt gekarakteriseerd door een *lengte* (nl. de golflengte van de lichtgolven). Polarisatie kan overigens optreden bij alle denkbare elektromagnetische straling en is dus niet beperkt tot licht. Zo kunnen bijvoorbeeld radargolven, radiogolven of röntgenstralen eveneens gepolariseerd zijn.

Het volgende is nu van belang: men kan *natuurlijk* (ongepolariseerd) licht ook opvatten alsof het is opgebouwd uit slechts *twee*, onderling loodrechte trillingsrichtingen. Wiskundig komt dit op hetzelfde neer als wanneer men alle trillingsmogelijkheden beschouwt. Wel moeten deze twee trillingen dan in willekeurige volgorden trillen: ze zijn dus niet coherent. Als diagrammetje is deze voorstelling vaak wat hanteerbaarder. Als bijvoorbeeld natuurlijk licht door de een of andere oorzaak opgesplitst wordt in twee gepolariseerde bundels, kan dit gemakkelijk anschouwelijk worden voorgesteld met zo'n diagram (zie fig. 3).

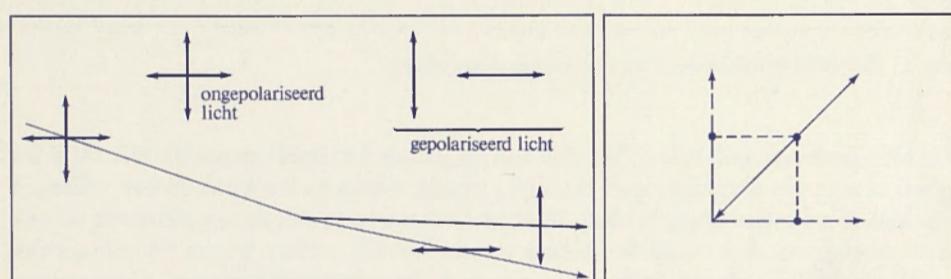


fig. 3 De splitsing van ongepolariseerd licht in gepolariseerd licht kan men gemakkelijk met trillingsdiagrammetjes als fig. 2 weergeven.

fig. 4 Ontleding van gepolariseerd licht in twee, loodrecht op elkaar trillende lichtbundels.

Gepolariseerd licht kan men ook ontleden in twee, loodrecht op elkaar staande trillingen (fig. 4). Hier trillen deze echter *wel* coherent en zijn ze bovendien in fase: ze trillen tegelijk. Bij natuurlijk licht is deze coherentie afwezig. Dit soort ontledingen zijn van belang als men zich wil voorstellen wat er gebeurt als licht zich voor verschillende polarisatierichtingen anders gedraagt (bijv. anders gebroken wordt).

2 Lineair gepolariseerd licht en circulair gepolariseerd licht

Lineaire polarisatie is niet de enige vorm van gepolariseerd licht. Een deeltje kan, behalve heen en weer trillen, ook een *circelvormige* beweging maken. De lichtgolf die hij dan

uitzendt vormt een soort spiraal. Deze vorm van polarisatie noemt men *circulaire* polarisatie; deze is dan niet gekarakteriseerd door een richting, maar door een *draaizin*. Men spreekt van links- of rechtsdraaiend licht al naar gelang het deeltje (of de golf) tegen de wijzers van de klok in of met de wijzers mee loopt. De in fig. 5 afgebeelde lichtgolf is dus rechtsdraaiend.

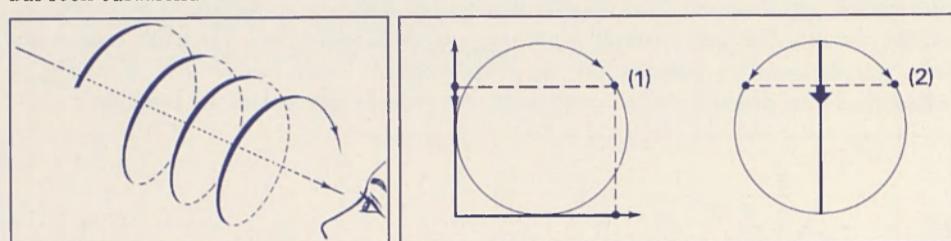


fig. 5 Circulaire lichtgolf (rechtsdraaiend).

fig. 6 Samenstelling circulair licht uit twee lineaire golven (1) en samenstelling lineair licht uit twee circulaire golven (2).

Van belang is, dat men circulair licht ook kan opvatten als de *som* van twee coherente lineaire golven, die loodrecht op elkaar trillen. De *fase* van deze twee golven moet dan wel 90° verschillen, d.w.z. dat het ene 'deeltje' zich in zijn uiterste stand moet bevinden als het andere zich juist tussen zijn uiterste standen in bevindt (fig. 6). Omgekeerd kan men lineair licht opgebouwd denken uit twee tegengesteld draaiende circulaire golven. De optelling van deze bewegingen resulteert in een lineair gepolariseerde golf.

Bestaat licht nu uit een mengeling van lineair en circulair gepolariseerde golven, dan hebben wij het meest algemene geval van polarisatie. Men spreekt dan van *elliptisch* gepolariseerd licht, omdat de sombeweging van twee van zulke trillingen (een cirkel en een lijn) een ellips vormt (fig. 7).

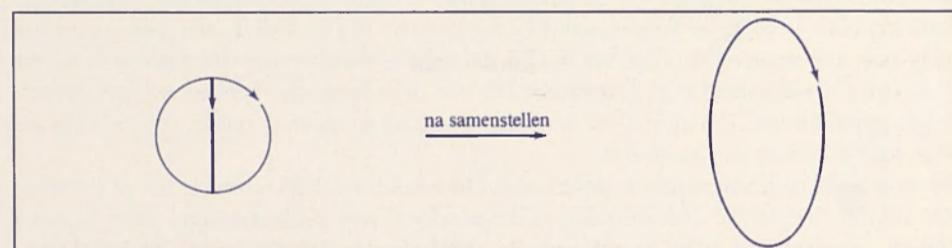


fig. 7 Elliptisch licht kan men opvatten als de sombeweging van lineair en circulair licht.

Men zou dus kunnen zeggen, dat er aan het lineaire licht een circulaire component is toegevoegd, of omgekeerd. Elliptisch licht wordt dus gekarakteriseerd door een richting (als bij lineair licht) en door een draaizin (als bij circulair licht). Ook dit licht kan men opgebouwd denken uit twee lineaire golven. Nu hoeven deze echter niet meer loodrecht op elkaar te staan en hun faseverschil behoeft geen 90° te zijn. Ook hoeft de grootte van de trillingen niet gelijk te zijn. Hieruit blijkt wel, dat dit inderdaad de meest algemene vorm van polarisatie is.

Wij zullen in onze beschouwing dit licht echter meestal opgebouwd denken uit een lineair en een circulair deel, wat de eenvoudigste voorstelling is. In dit boek spreken wij dus alleen over circulair en lineair licht, en behandelen elliptisch licht alleen in de zin dat hier een *mengeling* is ontstaan.

3 Gedeeltelijk gepolariseerd licht en polarisatiegraad

Het licht dat ons bereikt is doorgaans niet volledig gepolariseerd. Voor lineair licht betekent dit, dat het trillingsvlak van de golven wel een voorkeursrichting heeft, maar dat er ook trillingen in andere vlakken voorkomen. In zijn meest algemene vorm is gedeeltelijk gepolariseerd licht opgebouwd uit een component die lineair gepolariseerd is, één die circulair gepolariseerd is en een ongepolariseerd deel. De mate waarin het licht gepolariseerd is noemen we de *polarisatiegraad*. Voor lineair licht is in fig. 8 schematisch met diagrammetjes voorgesteld wat gedeeltelijke polarisatie betekent.

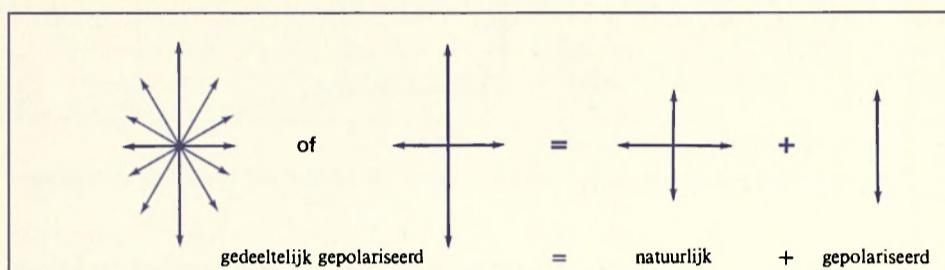


fig. 8 Gedeeltelijk gepolariseerd licht kan men opvatten alsof het bestaat uit een volledig gepolariseerd en een volledig ongepolariseerd deel.

De *lineaire* polarisatiegraad P is gegeven voor de intensiteit van het licht in de voorkeursrichting van het trillingsvlak I_{\parallel} , minus de intensiteit van het licht loodrecht hierop, I_{\perp} , en dit gedeeld door de totale intensiteit van het licht, die men voor kan stellen als $I_{\parallel} + I_{\perp}$. Deze grootheid kan variëren van nul tot één (0%-100%), en geeft het percentage lineair gepolariseerd licht in de lichtbundel aan.

De *circulaire* polarisatiegraad q is op een dergelijke wijze gedefinieerd en geeft het percentage circulair licht in de bundel aan. Hierbij moeten wij bedenken, dat men natuurlijk licht ook kan voorstellen alsof het bestaat uit twee niet-coherente circulaire golven, die links- en rechtsdraaiend zijn. Overheerst één van deze twee, dan hebben wij met gedeeltelijk gepolariseerd circulair licht te doen. Natuurlijk moet de *totale* polarisatiegraad $P + q$ altijd kleiner dan 100% zijn.

Soms spreekt men van *negatieve* polarisatie. Dit betekent dat de richting van de polarisatie afwijkt: negatieve linksdraaiing correspondeert met rechtsdraaiing. Met negatief lineair gepolariseerd licht wordt bedoeld dat het polarisatievlak (d.i. de voorkeursrichting van het trillingsvlak) 90° gedraaid is ten opzichte van een te voren vastgesteld vlak.

Er bestaat natuurlijk een nauw verband tussen de lineaire polarisatiegraad P en I_{\parallel} en I_{\perp} . Indien bijv. $P = 50\%$, dan is $I_{\parallel} : I_{\perp} = 3 : 1$, dus is er drie keer meer licht in de richting van het voorkeursvlak dan loodrecht erop. Andere voorbeelden:

P	$I_{\parallel} / I_{\perp}$	P	$I_{\parallel} / I_{\perp}$
5%	$21 : 19 = 1,11$	60%	$4 : 1 = 4,0$
10%	$11 : 9 = 1,22$	70%	$17 : 3 = 5,7$
20%	$3 : 2 = 1,50$	75%	$7 : 1 = 7,0$
30%	$13 : 7 = 1,86$	80%	$9 : 1 = 9,0$
40%	$7 : 3 = 2,33$	90%	$19 : 1 = 19,0$
50%	$3 : 1 = 3,0$	100%	$1 : 0 = \infty$

Dezelfde tabel geldt voor de circulaire polarisatiegraad q ; hier moeten wij echter ipv. P , q lezen en I_L / I_R of I_R / I_L ipv. I_{L1} / I_{R1} (I_L, I_R zijn hier de links- resp. rechtsdraaiende intensiteit).

Bij een polarisatiegraad van < 5 a 10% zullen wij meestal spreken van nauwelijks of niet gepolariseerd licht, tussen 5 a 10% en 15 a 20% van zwak gepolariseerd licht, bij 20 - 60% van sterke polarisatie en hierboven soms van zeer sterke polarisatie. Bedraagt de polarisatiegraad 100% , dan spreekt men van volledig totaal gepolariseerde licht.

Er zijn processen in de natuur die lineair, circulair en natuurlijk licht in elkaar om kunnen zetten (reflectie e.d.). In dat geval verandert dus P of q . Ook kan bij lineair licht het polarisatievlak gedraaid worden, of bij circulair licht de draaizin veranderen. Hier kan dus P of q gelijk blijven, maar verandert wel het karakter van het gepolariseerde licht. In dit boek zullen processen waarbij dit gebeurt worden besproken in deel III; zulke processen zijn van het grootste belang voor de vorming en verschijningswijze van gepolariseerd licht in de natuur. Hierbij tekenen wij nog aan, dat de meeste polarisatie van het licht om ons heen *lineair* is. Circulaire polarisatie komt aanzienlijk minder in de vrije natuur voor.

4 Polarisatierichting, definities

Hier gebruiken wij de volgende terminologie. Vaak is licht oorspronkelijk afkomstig van de een of andere lichtbron, en vervolgens verstrooid of weerkaatst door deeltjes of oppervlakken. Hierbij is het licht meestal in meer of mindere mate gepolariseerd.

Tangentiële gepolariseerd noemen wij lineair licht, dat loodrecht op de verbindinglijn lichtbron-voorwerp trilt. Zulk licht kan worden uitgedoofd door een filter in radiële stand te houden (§ 7).

Radieel gepolariseerd als het licht in de richting van deze verbindinglijn trilt. Dit licht wordt uitgedoofd door een filter in tangentiële stand.

Horizontaal gepolariseerd als het licht parallel met een bepaald kaatsend of brekend plat vlak trilt.

Verticaal gepolariseerd als het licht loodrecht op dit vlak trilt.

Dit slaat dus allemaal op *lineair* gepolariseerd licht. Zo is weerkaatst licht horizontaal, gebroken licht verticaal, regenbooglicht tangentieel en halolicht doorgaans radieel gericht; dit verwijst dus altijd naar de trillingsrichting van de (*elektrische*) lichtgolf.

Bij *circulair* licht spreken wij van links- of rechtsdraaiend licht (zie § 2).

Al deze mogelijkheden zijn weergegeven in fig. 9.

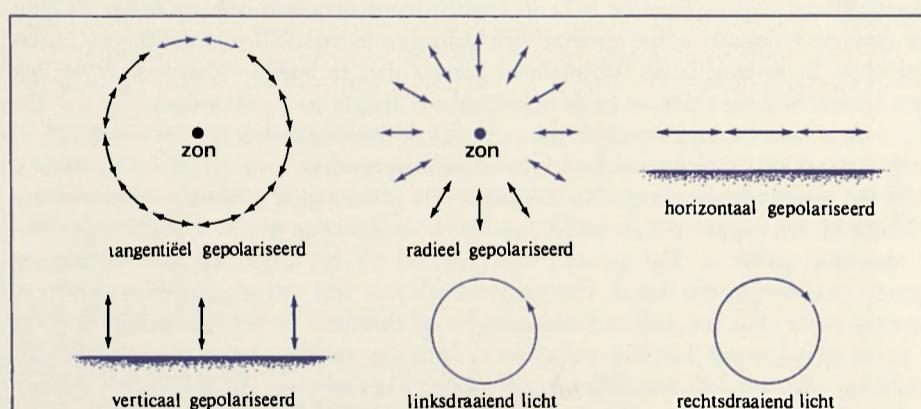


fig. 9 Tangentiële, radiaal, horizontaal, verticaal, links- en rechtsdraaiend gepolariseerd licht.

De term *negatieve polarisatie* wordt tenslotte alleen gebruikt om aan te geven dat de polarisatierichting of draaizin tegengesteld is aan die welke men normaal op een bepaalde plaats of voorwerp verwacht (§ 3).

5 Polarisatie van licht: waarom komt dit zo vaak voor?

Merkwaardig genoeg bevat ongepolariseerd licht door zijn structuur al de elementen van polarisatie. Licht is een *transversale* golf, hetgeen betekent dat de trillingen altijd loodrecht op de voortplantingsrichting gebeuren. Een lichtgolf trilt *nooit* in zijn bewegingsrichting (dit soort longitudinale trillingen treden wel bij o.a. geluidsgolven op). Kijkt men nu loodrecht tegen de trillingen van een lichtgolf aan, dan zien wij dus alleen maar trillingen in één richting, *wat ook de polarisatie van de oorspronkelijke golf is* (zie fig. 10). Met andere woorden, als door de een of andere oorzaak de lichttrilling loodrecht op zijn

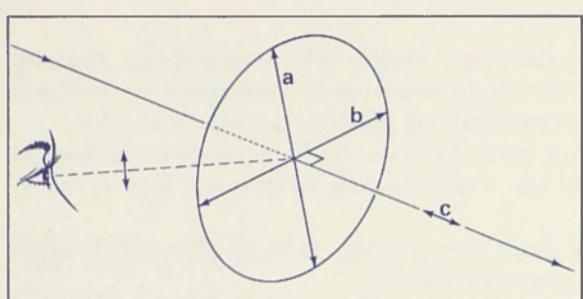


fig. 10 Een lichtgolf is transversaal, en trilt dus alleen loodrecht op zijn bewegingsrichting. Trilling a en b zijn wel mogelijk, trilling c niet. Kijkt men loodrecht op de golf, dan ziet men alleen trillingen in één richting (polarisatie).

oorspronkelijke bewegingsrichting wordt doorgegeven, zal dit gebeuren in de vorm van lineair licht. Het transversale karakter van lichtgolven is dus op zich zelf al voldoende om ongepolariseerd licht in lineair licht om te zetten. Polarisatie door strooien aan kleine deeltjes en door weerkaatsing aan oppervlakken zijn hier onmiddellijk op terug te voeren; polarisatie door bijv. breking is weer een direct gevolg van polarisatie door weerkaatsing, omdat in de ene trillingsrichting dan meer licht verloren is gegaan dan in de andere en dus niet het materiaal inkomt.

Omzetting van ongepolariseerd licht in gepolariseerd licht kan ook optreden als licht door materie heengaat en het *materiaal* lichttrillingen in verschillende richtingen anders beïnvloedt. In materie is de lichtsnelheid kleiner dan er buiten, waardoor er bij het binnentrekken breking optreedt en de lichtstraal een andere weg gaat volgen (fig. 11). De mate waarin deze breking optreedt hangt af van de brekingsindex van het materiaal, n . Bij zijn weg door het materiaal heen kan het licht bovendien voor een deel verdwijnen, omdat het geabsorbeerd wordt. Nu bestaan er een groot aantal materialen die *anisotrop* zijn, hetgeen wil zeggen dat de brekingsindex of de absorptie niet in alle richtingen van het materiaal gelijk is. Dit gebeurt bijvoorbeeld als het materiaal in één richting opgerekt of samengeperst wordt. Het verticaal trillende deel van ongepolariseerd licht in figuur 12 'voelt' dus een andere brekingsindex of absorptie als het horizontale deel. In het eerste geval wordt het ongepolariseerde licht dan gesplitst in twee gepolariseerde lichtstralen, die een iets verschillende weg door het materiaal volgen; in het tweede geval verdwijnt er langzamerhand meer licht van de ene richting dan van de andere, zodat het geleidelijk in gepolariseerd licht wordt omgezet.

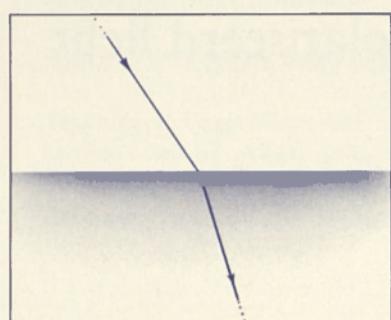


fig. 11 Bij het binnengaan van licht in een materiaal treedt breking op: de snelheid wordt minder en de richting verandert.

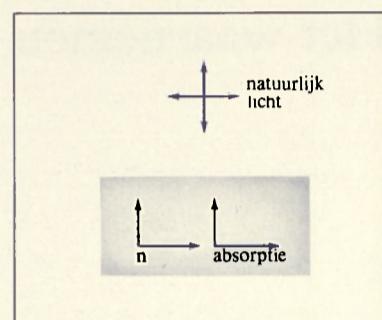


fig. 12. Bij doorgang van natuurlijk licht door een anisotrope stof treedt polarisatie op, omdat de brekingsindex (n) of de absorptie niet voor alle trillingsrichtingen gelijk is.

Praktisch alle omzettingen van natuurlijk licht in gepolariseerd licht zijn terug te voeren tot het transversale karakter van lichtgolven (hetgeen men kan opvatten als een anisotropie in de trillingen) of tot anisotropie van de materie waarmee licht een wisselwerking ondergaat. Hetzelfde geldt voor omzettingen van de ene soort polarisatie in de andere. In deel III wordt op al deze mogelijkheden dieper ingegaan. Het blijkt, dat al deze omzettingen eigenlijk veel waarschijnlijker zijn dan bijvoorbeeld van de ene kleur in de andere: in feite is dus de kans op een gepolariseerde natuur zelfs groter dan op een gekleurde natuur.

Het waarnemen van gepolariseerd licht

6 Met het blote oog

Bijen, mieren, watervlooien, rivierkreeftjes, fruitvliegjes, sommige vissen en een aantal andere dieren kunnen gepolariseerd licht gemakkelijk onderscheiden van natuurlijk licht, zoals wij gemakkelijk kleuren uit elkaar kunnen houden. Deze diertjes, die wel gebruik maken van dit vermogen om zich te kunnen oriënteren, 'zien' de polarisatie van het licht soms al bij een polarisatiegraad van 10%. De mens is daarentegen bijna 'polarisatieblind' en moet zich doorgaans met een filter behelpen om de polarisatie van licht vast te stellen. Niettemin, als het licht bijzonder sterk gepolariseerd is (bijv. > 60%) kunnen wij dit toch *met het blote oog* vaststellen, ofschoon niet ieder mens dit vermogen schijnt te bezitten. In een vlak dat gepolariseerd licht uitzendt zien wij dan namelijk een gelig figuurtje verschijnen, dat wij in natuurlijk licht niet zien. Dit zijn de zgn. 'bundels van Haidinger', zo genoemd naar de ontdekker (fig. 13). De oriëntatie van dit figuurtje hangt af van de trillingsrichting van het licht en roteert met dit vlak mee. Zijn diameter is ongeveer 3° in de lengterichting. Het verschijnt precies in het midden van het gezichtsveld, dus bij de gele vlek; het ontstaan schijnt samen te hangen met dichroïte eigenschappen (zie § 84) van de gele vlek. De bundels van Haidinger kan men bijv. zien in de blauwe lucht, die op 90° van de zon sterk lineair gepolariseerd is (§ 15). Ook in circulair licht verschijnt er zo'n figuurtje; hier hangt de oriëntatie af van de draaizin van het licht (fig. 14). Bij circulair licht blijken deze bundels overigens veel moeilijker waarneembaar te zijn dan bij lineair licht.

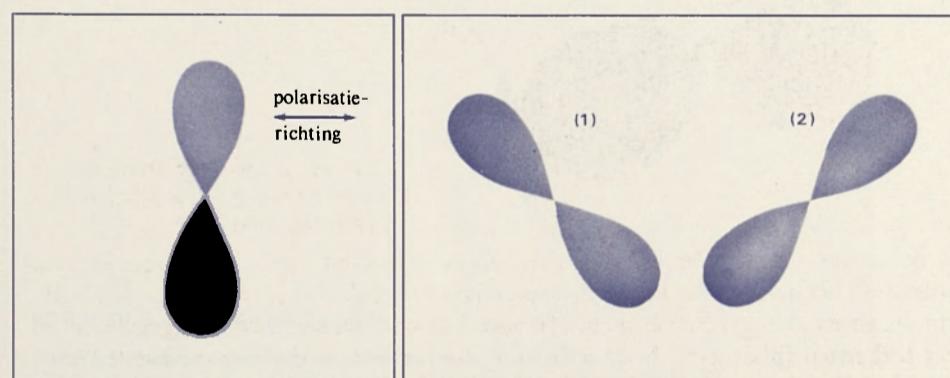


fig. 13 Bundels van Haidinger bij lineair licht.

fig. 14 Bundels van Haidinger bij linksdraaiend (1) en rechtsdraaiend (2) licht.

Indien men zich een voorstelling wil maken van het uiterlijk van deze bundels, dan kan men ze het beste vergelijken met de bundels van Brewster, die men te zien krijgt als men door bepaalde mineralen kijkt (§ 70). Een foto van deze bundels is afgebeeld als plaat 85 op blz. 112. Het schijnt dat de ontstaanswijze van de bundels van Haidinger inderdaad min of meer vergelijkbaar is met die van de bundels van Brewster.

Men kan zich erop trainen de bundels van Haidinger te zien. Hiervoor neemt men een lineair polarisatiefilter en kijkt er door naar een wit vlak of een witte wolk. Men zal dan al snel opmerken dat het midden van het beeldveld gelig is. Bij roteren van het filter ziet men dat deze gele vlek een structuur heeft die meedraait met het filter.

Hieraan willen wij nog de volgende markante waarneming toevoegen. Zoals de zon, maan, sterrenbeelden, regenbogen en andere verschijnselen groter lijken als ze zich dicht bij de horizon bevinden, zo lijken ook de bundels van Haidinger hier groter. Men kan dit het beste constateren met een lineair filter: als men ze hoog in de lucht of diep naar beneden, bijvoorbeeld op een zandvlakte ziet, zijn ze duidelijk kleiner. De verklaring hiervan is dezelfde als voor de zon e.d.: een spectaculair gezichtsbedrog!

7 Waarnemen met filters

Verreweg de gemakkelijkste manier om polarisatie van licht vast te stellen is gebruik te maken van *filters*. Zo'n filter heeft de eigenschap het licht van slechts één trillingsrichting door te laten, of van één draaizin. In het eerste geval hebben wij te doen met een lineair filter; hiermee kan men lineair gepolariseerd licht als zodanig herkennen. Zo'n filter wordt ook wel een *polaroid* genoemd. Een polaroidzonnenbril ('anti-glans' zonnebril) heeft als 'glazen' zulke lineaire polarisatiefilters; deze zijn verticaal gericht (fig. 15). In het tweede geval hebben wij te maken met een circulair filter. Valt er gepolariseerd licht door een filter, dan is hij doorzichtig indien de trillingsrichting van het licht, of de draaizin hiervan voor het licht en het filter gelijk zijn. Is deze richting of draaizin precies tegengesteld, dan is het filter ondoorzichtig en dus zwart.



fig. 15 Lineaire polarisatiefilters worden o.a. toegepast in 'anti glans' (polaroid) zonnebrillen.

Bij het roteren van een *lineair* filter zien wij de intensiteit van het doorgelaten licht variëren als het invallend licht lineair gepolariseerd is. Valt er echter *natuurlijk* of *circulair* licht doorheen, dan gebeurt er niets. Hiermee kan men dus slechts lineair gepolariseerd licht herkennen (plaat 4-7). Is de polarisatie van het invallende lineaire licht volledig, dan is het filter in een bepaalde stand ondoorzichtig; bij gedeeltelijke polarisatie alleen afgezwakt. Frappant is vaak het afzwakken van een bepaald voorwerp, dat zich tegen een achtergrond van natuurlijk of circulair licht aftekent.

Circulaire filters zijn of rechtsdraaiend of linksdraaiend. Hier moet men de helderheid door deze twee filters vergelijken om uit te zoeken of een bepaald voorwerp circulair licht uitzendt. Dit is natuurlijk minder gevoelig dan het roteren van een lineair filter, zodat circulair licht moeilijker waarneembaar is. Een circulair filter bestaat doorgaans uit een lineair filter en een extra plaatje dat lineair licht in circulair licht omzet. Men moet er altijd voor zorgen, de goede kant voor het oog te houden. Kijkt men er in omgekeerde richting door, dan is het filter een lineair filter. Een plaatje dat lineair in circulair licht omzet noemt men een *kwartlambda plaatje* (§ 93).

Onder *gekruiste* filters verstaat men twee filters die zodanig gehouden worden, dat ze elkaar licht niet doorlaten. Dit zijn dan bijvoorbeeld een rechts- en linksdraaiend filter, of twee lineaire filters die 90° gedraaid zijn (plaat 1). *Parallelle (evenwijdige)* filters laten elkaar licht maximaal door. Licht dat door een lineair filter valt wordt omgezet van ongepolariseerd in volledig lineair licht. Bij een circulair filter is deze omzetting van ongepolariseerd naar circulair licht. Sommige filters hebben de eigenschap slechts voor een beperkt aantal kleuren het licht te polariseren. Men ziet dan een verkleuring optreden in plaats van een uitdoving. Overigens zijn de meeste filters ook niet geheel ideaal, en ziet men bij het kruisen nog een zwak blauw licht door het filter heen komen (§ 70).

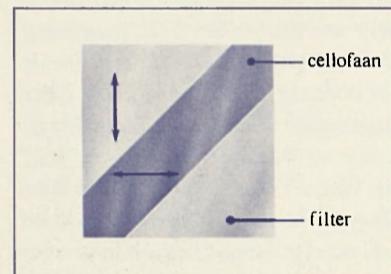
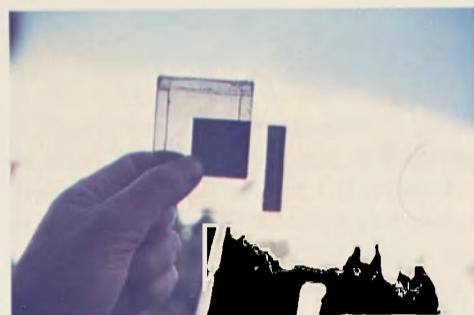


fig. 16 Polariscoop van Minnaert.

Bij lineair licht kan men de gevoeligheid van een filter nog flink opvoeren door er een *polariscoop* van te maken. Minnaert doet dit als volgt: men kruist twee filters en houdt hier tussen in een stukje cellofaanpapier (bijv. van een pakje sigaretten). Daar waar het cellofaan is, komt dan weer wat licht door de filters. Nu draait men het cellofaan zó, dat het doorgelaten licht maximaal wordt, en plakt het aan het filter vast. Het cellofaan keert dan de richting van het polarisatievlak om (fig. 16); het fungeert als 'halflambdaaplaatje' (§ 93). Draaien wij nu dit filter rond *met het cellofaan aan de kant van het invallend gepolariseerd licht*, dan zien wij contrastfluctuaties optreden tussen het deel met en het deel zonder cellofaan: een gedeelte van het filter heeft een tegengestelde richting gekregen. Het filter is zo een gevoelig instrumentje geworden om lineair gepolariseerd licht waar te nemen (plaat 2-3).

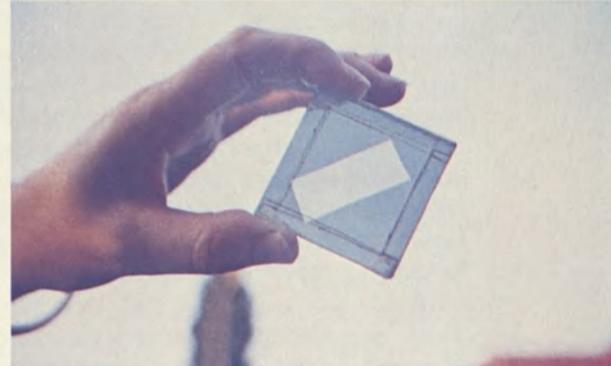
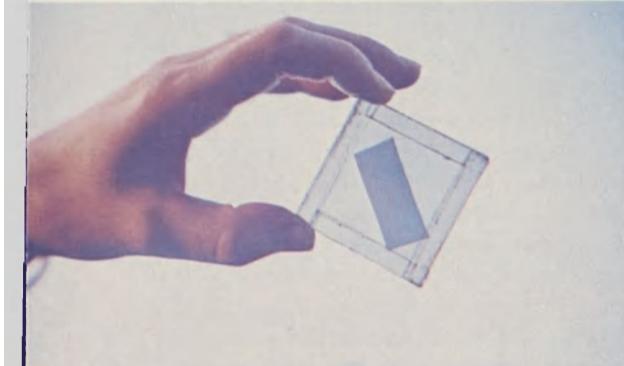
Men kan ook het cellofaan enkele malen dubbel vouwen en dan voor het filter plaatsen (§ 53). Dan zien wij dit in kleuren oplichten, als wij gepolariseerd licht bekijken. Daar het oog gevoeliger is voor kleuren dan voor intensiteitsveranderingen, is deze methode gevoeliger. Een nadeel is echter dat zo'n filter ook op circulair licht reageert. In het algemeen is dit echter niet zo bezwaarlijk, daar de hoeveelheid circulair licht in de natuur maar gering is. Als men deze polariscoop bij invallend lineair licht roteert dan zien wij kleurveranderingen optreden (plaat 61-62 op blz. 85). De *richting* van een lineair filter kan men gemakkelijk bepalen, als men weet dat een weerspiegeling *horizontaal* gepolariseerd is (plaat 4-5).

Waarnemen van polarisatie



Plaat 1 Gekruiste filters laten geen licht door (§ 7)

Plaat 2-3 Polariscoop van Minnaert tegen een ge-polariseerde achtergrond in twee standen. Dit is een simpel maar gevoelig instrumentje om polarisatie vast te stellen (§7).



▼ Plaat 4-7 De glans van glas of water is horizontaal gepolariseerd (§ 54); door kaatsing tegen het metalen mes verandert dit in circulair licht (§ 48, 74, 91). Boven: met een lineair filter kan men de glans van het tafeltje wegnemen, maar vertoont het mes nauwelijks verschil. Onder: met circulaire filters vertoont het mes verschillen, het tafeltje niet. Pijltjes geven de richting van het lineaire filter voor de camera aan. L is links-draaiend, R rechtsdraaiend circulair filter voor de camera (§ 7).



Naast kunstmatige filters bestaan er ook 'natuurlijke' filters om ons heen, in de vorm van wateroppervlakken. Deze weerspiegelen verticaal licht veel minder effectief dan horizontaal licht. Door de weerkaatsing van een voorwerp in het water (of in een glasplaat) te beschouwen (§ 15), kan men zonder verdere hulpmiddelen de lineaire polarisatie hiervan vaststellen! – Een andere wijze om op eenvoudige manier zelf een polarisatiefilter te maken is een groot aantal glasplaatjes op elkaar te stapelen. Deze stapel blijkt dan als lineair polarisatiefilter van behoorlijke kwaliteit te fungeren, mits men er *schuin* doorheen kijkt (§ 79).

Bij het waarnemen van gepolariseerd licht moet men het volgende goed bedenken. Kijkt men schuin door een spiegelruit naar een verlicht voorwerp, dan wordt dat licht op zijn weg naar de waarnemer toe gepolariseerd door de brekingen die het licht in de glasplaat ondergaat. Hierdoor is het waarnemen van zwak gepolariseerd licht door zo'n ruit iets dat snel tot verkeerde conclusies aanleiding kan geven, en moet men altijd goed bedacht zijn op dit storende effect. Hoe schuiner' men door zo'n ruit kijkt, des te sterker wordt het doorvallende licht gepolariseerd (op ditzelfde effect berust overigens het hierboven beschreven filtertje van glasplaatjes). Ook autoruiten en vliegtuigramen laten gepolariseerd licht niet ongemoeid, zoals men wel kan zien aan de 'vlekken' die men vaak ziet verschijnen als men een polaroidzonnebril op heeft. Ook hier moet men dus voorzichtig zijn, en bij voorkeur door een deel van deze ruit kijken die deze eigenschap niet of nauwelijks bezit, met het oog er vlak op. Als het enigszins mogelijk is moet men echter altijd proberen dit soort waarnemingen buitenhuis te verrichten.

Tenslotte bestaan er naast de genoemde, gewone polarisatiefilters ook nog veel duurdere, maar gevoeliger instrumentjes om gepolariseerd licht te bestuderen. In dit boek beperken wij ons echter tot die waarnemingen van gepolariseerd licht in de natuur die met gewone, eenvoudige filters te doen zijn.

Wat betreft de filters gebruiken wij in dit boek de volgende terminologie. Lineaire polarisatiefilters duiden wij aan met de woorden *polaroid*, *lineaire filters* of kortweg met *filters*; al naar gelang de stand spreken wij van een *horizontaal*, *verticaal*, *radieel* of *tangenteel* (gericht) filter (§ 4). Circulaire polarisatiefilters worden meestal *circulaire filters* genoemd, of al naar gelang hun doorlatingsvermogen, aangeduid met *linksdraaiende* of *rechtsdraaiende filters*.

8 Minimaal waarneembare polarisatiegraad

De minimaal waarneembare polarisatiegraad met een filter hangt af van ons vermogen helderheidscontrasten te zien. Dit vermogen is het grootst bij daglicht, en aanzienlijk minder bij maanlicht. Met een polariscoop die men voor het oog draait is de situatie het gunstigst, omdat men het helderheidscontrast direct en tegelijk ziet wisselen door en naast het cellofaan. Bij een roterend filter (voor lineair licht) zien wij de helderheid wel variëren, maar moeten wij deze toch even onthouden. Om circulair licht te zien moet men het contrastverschil van twee verschillende filters, die nooit helemaal gelijk zijn, vergelijken. Dit is de ongevoeligste manier. Circulair licht kan men dus altijd minder goed waarnemen dan lineair licht. Globaal kan men het volgende aanhouden:

<i>Methode</i>	<i>Minimale P (of q)</i>	<i>Methode</i>	<i>Minimale P (of q)</i>
Bundels van Haidinger	> 50%	Circulaire filters	20%
Lineair filter	10-15%	Lineair filter bij maanlicht	50%
Polariscoop	5-10%	Polariscoop bij maanlicht	30%

De waarneembaarheid van gepolariseerd licht hangt ook af van het al dan niet gepolariseerd zijn van de *achtergrond* waartegen het zich aftekent. Is de polarisatierichting hiervan tegengesteld gericht (een 46° halo in de blauwe lucht) dan is de situatie veel gunstiger dan wanneer ze gelijk gericht zijn (een wolk tegen de blauwe lucht), omdat dan in het laatste geval voorwerp en achtergrond gelijk verzwakt worden met een filter. In zo'n geval verdient het gebruik van een polariscoop de voorkeur, omdat men met een gewoon filter vaak onbewust het contrastverschil van het voorwerp ten opzichte van zijn achtergrond beschouwt.

9 Laveren met licht: een proefje met drie polarisatiefilters

In deze paragraaf beschrijven wij een simpel proefje met lineaire polarisatiefilters, waaruit men duidelijk kan leren dat er 'iets bijzonders' met gepolariseerd licht aan de hand is. Hiertoe kruisen wij eerst twee lineaire filters, zodat ze geen licht doorlaten. Nu nemen wij een derde filter, en wel zo dat de richting ervan een hoek van zo'n 45° maakt met het eerste maakt. Als wij dit laatste filter *tussen* de twee andere in plaatsen, dan blijkt deze openvolgeling wél licht door te laten!

De oorzaak hiervan is de zgn. dubbele (vector)ontbinding van het gepolariseerde licht door het middelste en laatste filter, volgens hetzelfde principe dat het schuin tegen de wind in varen van zeilboten mogelijk maakt. Het middelste filter is niet gekruist ten opzichte van het eerste, en deze combinatie laat dus licht door. Dit doorgelaten licht trilt echter met een hoek van 45° ten opzichte van het achterste filter, zodat het ook hierdoor gedeeltelijk doorgelaten wordt; zonder dit middelste filter zou dat niet gebeuren. Dit is weergegeven in fig. 17.

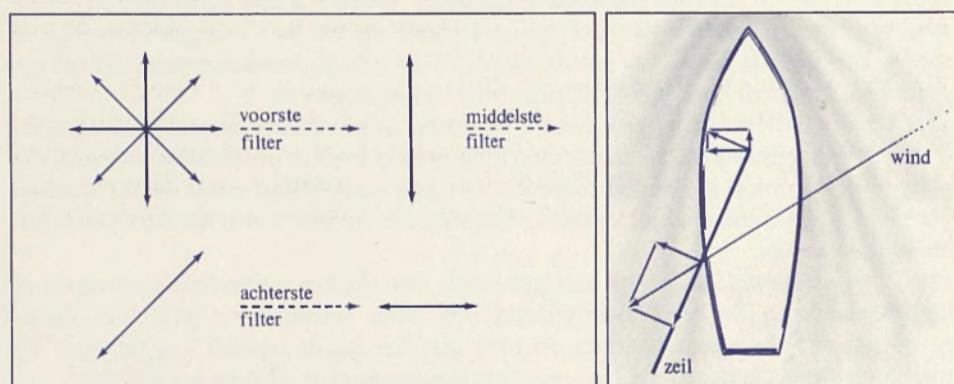


fig. 17 *Laveren met licht: drie filters, waarbij de voorste en de achterste gekruist zijn, laten toch licht door.*
fig. 18 *Een zeilboot kan door te laveren toch tegen de wind in zeilen.*

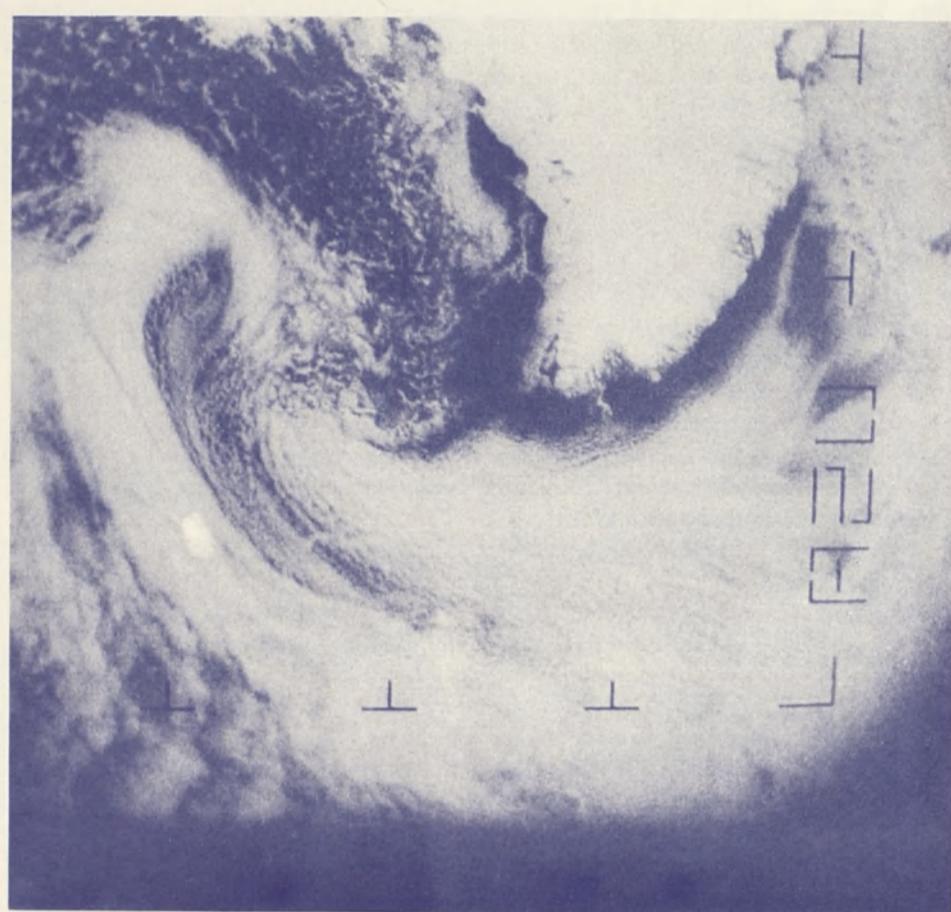
Bij een zeilboot die aan de wind zeilt gebeurt hetzelfde (fig. 18): de kracht die de wind op het zeil uitoefent wordt eerst omgezet in een kracht parallel met dit zeil (die verder geen rol speelt) en een kracht loodrecht hierop. Omdat het zeil schuin staat wordt deze laatste kracht ontbonden in één loodrecht op de boot en één in de vaarrichting, die in de wind is. Als het zeil geen hoek maakt met de boot maakt, treedt deze dubbele ontbinding van krachten niet op en is tegen de wind in laveren onmogelijk. Gezien deze parallel tussen zeilen en het doordelen van licht door drie filters kan men ook bij gepolariseerd licht met recht spreken van een laveermanoeuvre om licht door te laten.

10 De geschiedenis van de ontdekking van polarisatie

Aan het einde van dit deel geven wij een overzicht van de geschiedenis van de ontdekking van de polarisatie in chronologische volgorde, waarbij wij speciaal de ontdekking van de polarisatie van het licht in de natuur noemen zoals dat in dit boek ter sprake komt. Een gedeelte van dit overzicht is overgenomen van Gehrels, andere stukken zijn verspreid uit de literatuur over dit onderwerp gehaald.

- ca. 1000** De Vikingen ontdekken de dichroïtische eigenschappen van kristallen als cordiëriet. Met deze kristallen als filter nemen ze de polarisatie van het hemellicht waar, om bij afwezigheid van de zon een mogelijkheid te hebben om te navigeren.
- 1669** Erasmus Bartolinus uit Denemarken ontdekt de dubbelbreking van calcietkristallen.
- 1690** Huygens ontdekt de polarisatie van de twee dubbelgebroken stralen van calciet, zonder echter dit verschijnsel te kunnen verklaren.
- 1808** Malus ontdekt de polarisatie van weerkaatst licht, door als filter een calcietkristal te gebruiken – dit verliest schijnbaar zijn dubbelbreking als het invallend licht gepolariseerd is en het kristal in de juiste stand wordt gehouden. Later formuleert hij zijn wet, die het verband aangeeft tussen de stand van een filter en de hoeveelheid doorgelaten licht, als het invallend licht volledig (lineair) gepolariseerd is.
- 1809** Arago herontdekt de polarisatie van de blauwe lucht en ontdekt het naar hem genoemde neutrale punt. In 1811 ontdekt hij de optische activiteit van kwarts, in 1812 construeert hij een filter uit een stapel glasplaatjes. Tevens ontdekt hij in 1819 de polarisatie van komeetstaarten en de (geringe) polarisatie van 22° halo's als geheel in 1825. In 1824 ontdekt hij de polarisatie van de gloed die door heetgestookte metalen wordt uitgezonden. Ook stelt hij als eerste de polarisatie van de maan vast.
- 1811** Biot ontdekte de polarisatie van de regenboog. In 1815 constateert hij de optische activiteit van vloeistoffen als terpentijn en bestudeert in 1818 de optische activiteit van gasvormig terpentijn in een gaskolom van 15 meter lang. Helaas ontplofte dit apparaat voordat hij zijn metingen kon afsluiten. Biot ontdekte in 1815 tevens het sterke dichroisme van toermalijn.
- 1812** Brewster ontdekt de naar hem genoemde wet, die het verband aangeeft tussen de brekingsindex en de invalshoek waarbij licht door weerkaatsing geheel in lineair gepolariseerd licht wordt omgezet. In 1818 ontdekte hij de bundels van Brewster bij pleochroïtische kristallen en in 1842 het naar hem genoemde neutrale punt aan de hemel.
- 1816** Fresnel verklaart het bestaan van polarisatie theoretisch.
- 1828** Nicol vindt zijn prisma uit, dat beschouwd kan worden als het eerste goed bruikbare polarisatiefilter.
- 1840** Babinet ontdekt het naar hem genoemde neutrale punt aan de hemel.
- 1844** Haidinger ontdekt dat het menselijk oog het vermogen bezit om ongepolariseerd licht van gepolariseerd licht te onderscheiden, omdat in het laatste geval een geelachtig figuurtje op het netvlies verschijnt (de ‘bundels van Haidinger’).
- 1845** Faraday ontdekt de rotatie van het polarisatievlak in magneetvelden.
- 1852** Herapht maakt een kleurloos, transparant synthetisch kristal met een zeer sterk dichroisme, hetgeen de eerste stap vormt op de weg naar de constructie van eenvoudige polarisatiefilters.
- 1858** Liais ontdekt de polarisatie van de zonnecorona.

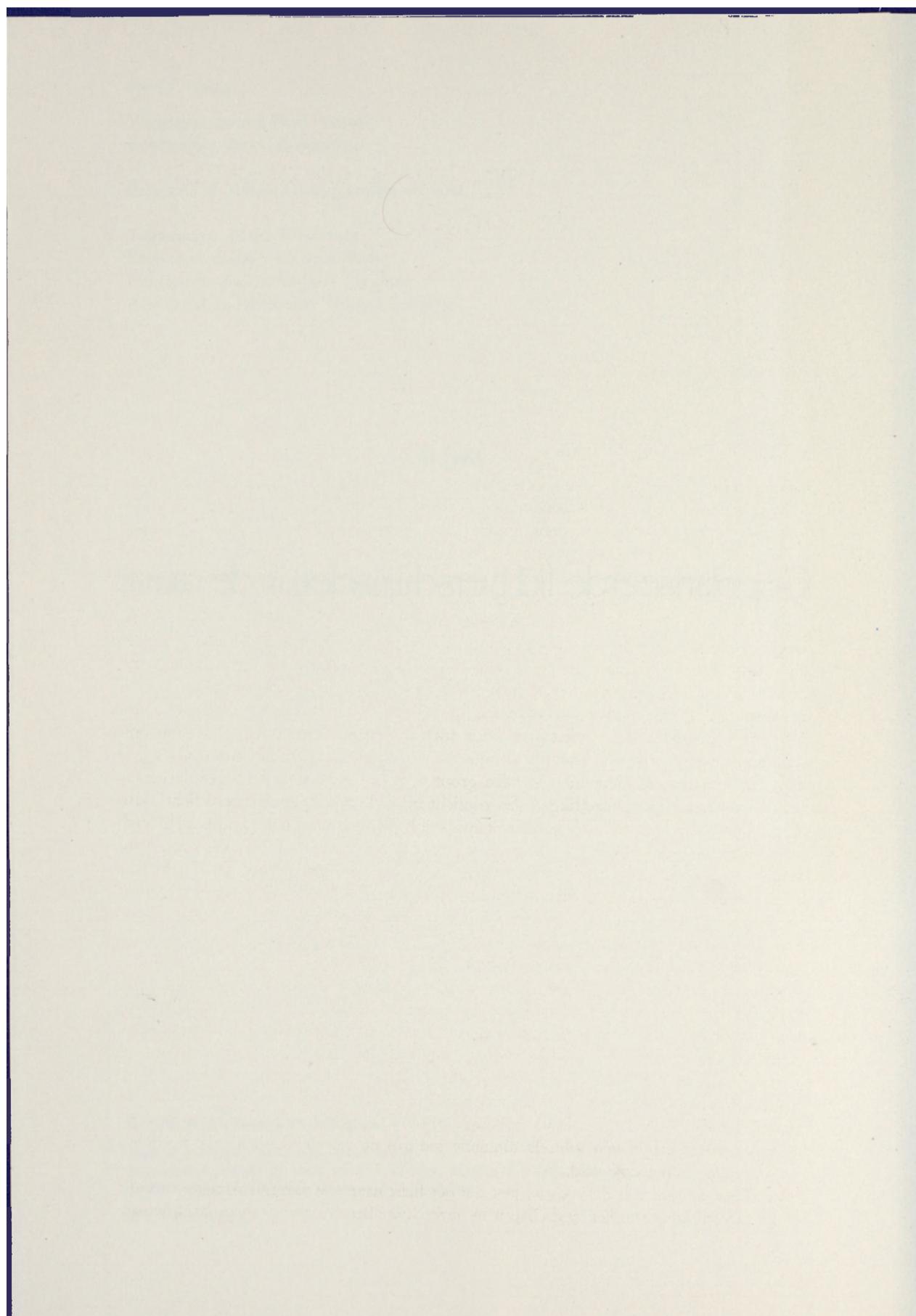
- 1860 Kirchhoff ontdekt dat gloeiend toermalijn gepolariseerd licht uitzendt, in overeenstemming met de door hem geformuleerde stralingswet.
- 1874 Wright ontdekt de polarisatie van het zodiakale licht.
- 1884 Kiessling stelt vast dat de glorie gepolariseerd is.
- 1889 Cornu ontdekt dat kunstmatige halo's in NaNO_3 kristallen sterk gepolariseerd zijn als gevolg van de dubbelbreking van deze kristallen.
- 1905 Umov formuleert zijn regel, die het verband aangeeft tussen de polarisatiegraad en het weerkaatsend vermogen van ruwe materialen.
- 1911 Michelson ontdekt dat bepaalde kevers een glans bezitten die circulair gepolariseerd is.
- 1928 Land construeert zijn eerste polarisatiefilter. Verdere ontwikkelingen ervan maakten het mogelijk polarisatieeffecten met een eenvoudig en praktisch filter te bestuderen: zulke filters worden ook in zonnebrillen e.d. gebruikt om schitteringen te onderdrukken. De ontwikkeling van dit soort filters betekende een grote vooruitgang ten opzichte van de tot dan toe gebruikte Nicol- en andere kristalfilters.
- 1935 Beth stelt vast dat circulair licht een zwak mechanisch koppel op materialen uitoefent, en toont hiermee direct het draaiend karakter van dit licht aan.
- 1939 Le Grand en anderen ontdekken dat het strooilicht onder water gepolariseerd is.
- 1940 Bricard ontdekt dat overtuigende mistbogen verschuiven als men deze door een lineair filter bekijkt en dit filter draait.
- 1947 Van de Hulst stelt de eerste bruikbare verklaring van de glorie op en verklaart zijn polarisatieeffecten.
- 1949 Von Frisch ontdekt dat bijen, beter dan mensen, in staat zijn gepolariseerd licht van ongepolariseerd licht te onderscheiden en dit vermogen gebruiken om zich te oriënteren.
- 1949 Hall en Hiltner ontdekken dat het licht van sterren zwak gepolariseerd is.
- 1954 Dombrovski ontdekt de sterke polarisatie van de Krabnevel.
- 1955 Shurcliff ontdekt dat het menselijk oog ook in staat is circulair gepolariseerd licht van ongepolariseerd licht te onderscheiden.
- 1956 Jaffe toont aan dat als eicellen van bepaalde algen door lineair licht worden bestraald, deze de neiging vertonen uit te groeien in de trillingsrichting hiervan.
- 1958 Duncan ontdekt de polarisatie van het poollicht.
- 1960 Witt stelt de polarisatie van lichtende nachtwolken ondubbelzinnig vast.



Plaat 8 Sinds de lancering van de eerste kunstmaan in 1957 kan men ook vanuit de ruimte licht- en polarisatieverschijnselen bestuderen. Deze foto is in 1975 opgenomen door de Amerikaanse weersatelliet ESSA 8 vanaf een hoogte van 1420 km. Linksboven is het met sneeuw bedekte vasteland van Groenland zichtbaar. Rechts hiervan, midden op de frontale wolkenband boven de oceaan vertoont de onderzon ($\S\ 39$) zich als een heldere vlek. Deze is aangegeven met pijltjes.

Deel II

Gepolariseerde lichtverschijnselen in de natuur



Licht en belichting, kleur en polarisatie van de natuur om ons heen: een overzicht

11 Licht, kleur en polarisatie

Ofschoon het ongepolariseerde zonlicht verreweg de belangrijkste bron is van het licht dat wij overdag om ons heen waarnemen, is het toch niet dit licht zelf dat de kleur en polarisatie van het landschap, voorwerpen en de lucht om ons heen bepaalt. De wijze waarop dit zich manifesteert hangt af van de manier waarop voorwerpen en deeltjes het zonlicht aan ons doorgeven. Het licht is dan aanzienlijk verzwakt, heeft vaak een kleur gekregen en blijkt dan veelal in meer of mindere mate gepolariseerd.

De manier en de mate waarin deze polarisatie optreedt hangt in sterke mate af van de weg die het heeft aangelegd: het kan via een voorwerp direct naar ons oog doorgegeven zijn (bijv. door weerkaatsing), maar zijn weg naar de waarnemer kan ook via vele deeltjes of voorwerpen gegaan zijn, die ieder de polarisatie van het licht modifieren.

De vergelijking tussen kleur- en polarisatieverschijnselen in het vrije veld dringt zich op. Het witte (ongekleurde) zonlicht resulteert toch in een gekleurde natuur om ons heen; het ongepolariseerde zonlicht resulteert in veel gepolariseerd licht om ons heen. Zoals de hoeveelheid kleur om ons heen groot is, is ook de hoeveelheid gepolariseerd licht zeer aanzienlijk. Omzettingen van zonlicht in gekleurd of gepolariseerd licht gaan echter doorgaans niet parallel, zodat wit licht sterk gepolariseerd kan zijn, en gekleurd licht helemaal geen polarisatie behoeft te vertonen. De polarisatieschakeringen zijn hierdoor geheel anders dan de kleurschakeringen van de natuur. Anders dan bij de kleurnuances worden de polarisatieschakeringen van het landschap nauwelijks door natuurliefhebbers opgemerkt; ze zijn dan ook niet of nauwelijks met het blote oog te zien. De rijkdom hiervan is echter niet minder en met een filter kunnen wij de vele nuances in de polarisatieverschijnselen plotseling wel ontwaren.

Bovenstaande vergelijking tussen kleur en polarisatie gaat alleen op, voor zover de polarisatie lineair is. *Circulair* licht is nogal zeldzaam in de natuur; het ontstaat slechts bij hoge uitzondering direct uit ongepolariseerd licht. Meestal wordt het *indirect* hieruit gevormd, en wel door een *modificatieketen*, waarbij het zonlicht eerst lineair en vervolgens circulair gepolariseerd wordt. Dit gebeurt echter alleen als al deze opeenvolgende modificaties door een toevallige samenloop van omstandigheden op de juiste manier samenwerken. Het feit dat circulair licht niettemin soms toch opvallend in de natuur kan optreden voegt echter een subtile dimensie toe aan de verscheidenheid van de lichtverschijnselen in het vrije veld.

Niet alleen de *aard* van de voorwerpen die het licht naar ons toezenden, maar ook de wijze van *belichting* van het landschap is in sterke mate bepalend voor de polarisatie van

het licht om ons heen. Bij een directe belichting door de zon of de maan is deze echter in principe gelijk: in beide gevallen hebben wij te maken met één sterke, ongepolariseerde lichtbron die het landschap en de lucht vanuit één bepaalde richting belicht. Ons oog is echter bij het zwakkere maanlicht veel minder gevoelig voor helderheidsverschillen die door het polaroid optreden. Hierdoor lijkt onze omgeving minder gepolariseerd licht te bevatten, zoals ook de door de maan beschenen natuur minder kleurrijk lijkt. Ook dit laatste is slechts schijnbaar en wordt veroorzaakt door de veel mindere kleurgevoeligheid van het oog onder deze omstandigheden. Zo is bijvoorbeeld de lucht bij maanlicht even blauw als bij zonlicht, maar zien wij dat niet: voor ons lijkt hij een witachtig waas voor de sterren.

Zware bewolking is wèl een andere belichtingsvorm. Hier is de belichting alzijdig, en ziet men dan ook nauwelijks schaduwen. De polarisatie van de natuur onder deze omstandigheden is duidelijk geringer dan bij een onbewolkte hemel. Bij nadere beschouwing blijkt er echter toch wat meer licht van boven dan van de horizon te komen, hetgeen tot een aantal markante polarisatieeffecten aanleiding geeft. Deze situatie is zeer het bestuderen waard, daar de polarisatierichtingen en -sterkten zo verschillen van die bij een onbewolkte lucht.

Een bijzonder geval vormt tenslotte de belichting van het landschap tijdens de schemering, bij weinig bewolking. Ook deze is alzijdig; het meeste licht komt hier echter van de horizon. Omdat de blauwe hemel, die dan verantwoordelijk is voor deze belichting, zelf al sterk gepolariseerd is, komen hier merkwaardige polarisatieeffecten tot stand. De hoeveelheid gepolariseerd licht in de natuur is in deze situatie aanzienlijk en er is ook meer circulair licht in de natuur dan bij heldere zon. Dit laatste komt omdat in de bovengenoemde modificaties: natuurlijk licht → lineair licht → circulair licht, de eerste stap niet langer noodzakelijk is. Een spookachtige vorm van schemer is tenslotte de belichting tijdens een totale zonsverduistering, waarbij zich afwijkende en spectaculaire polarisatieverschijnselen kunnen voordoen.

Tussen de bovenstaande drie belichtingsmogelijkheden (zonlicht, bewolking en schemering) bestaan natuurlijk slechts vage grenzen. Zo zal een vlak (water)oppervlak vaak een gedeelte van de blauwe lucht in de richting van de waarnemer kaatsen in plaats van het zonlicht zelf, zodat men hier eerder van een belichting als bij schemer kan spreken en er analoge effecten optreden. In de meeste gevallen kan men echter aan bovenstaande indeling vasthouden.

Verreweg het meeste licht van onze omgeving is ontstaan door weerkaatsing of strooising. Bij *zon-* of *maanlicht* leidt dit bijna altijd tot *tangentiële* gepolariseerd licht of *horizontaal* licht (als een kaatsend oppervlak erg glad is). De polarisatie is doorgaans maximaal bij voorwerpen die zich op ongeveer 90° van de zon bevinden, hoewel op deze regel ook wel uitzonderingen te vinden zijn. Ook de blauwe lucht heeft zijn maximale polarisatie op 90° van de zon. Bij *zware bewolking* is de polarisatie van het licht in de meeste gevallen *horizontaal*; bij *schemer* hangt het sterk af van de richting waarin men kijkt en of het weerkaatste licht afkomstig is van een sterk of zwakker gepolariseerd licht van de hemel. – In al deze gevallen is de polarisatie niet of nauwelijks kleurafhankelijk, zodat wij het licht wel kunnen uitdoven met een filter, maar hierbij doorgaans geen verkleuringen zien optreden.

Naast strooising en weerkaatsing zijn er nog een aantal processen die ook voor polarisatie van natuurlijk licht kunnen zorgen, zoals breking, dubbelbreking, oppervlaktegolven

etc. Al deze processen veroorzaken maar een betrekkelijk gering gedeelte van al het gepolariseerde licht in de natuur, maar door de afwijkende verschijningsvorm, polarisatierichting of het optreden van circulair licht nemen zij een geheel aparte plaats in tussen de polarisatieverschijnselen om ons heen. Hiernaast kan reeds gepolariseerd licht (afkomstig van bijvoorbeeld de blauwe lucht) gemodificeerd worden door processen als totale reflectie, weerkaatsing op metalen en vele andere mogelijkheden. Dit leidt doorgaans tot afwijkende polarisatierichtingen en ook wel tot het toevoegen van circulair licht, dus tot een grote variëteit in de polarisatie van het licht in ons milieu.

Kleurverschijnselen, gepaard gaande met polarisatieverschijnselen zien wij op prachtige wijze tot stand komen als gepolariseerd licht door dubbelprekende of door optisch actieve stoffen wordt gemodificeerd. Hier manifesteert onze 'polarisatieblindheid' zich in zijn meest spectaculaire vorm: een transparante stof vertoont met een polarisatiefilter plotseling de meest diepe kleurschakeringen! Bij vele mineralen (bijv. ijskristallen) kan men dit zien gebeuren; de 'vlekken' op autoruiten zijn hiervan een ander voorbeeld. De kleuren die op deze wijze zichtbaar worden behoren tot de fraaiste die de natuur ons kan bieden.

Uit deze opsomming blijkt al de enorme veelheid in polarisatieverschijnselen die in de natuur kunnen optreden. Het is merkwaardig zich te realiseren dat al deze nuances voor het ongewapende menselijk oog bijna onzichtbaar blijven, doch met behulp van een simpel polarisatiefilter op een schitterende wijze te voorschijn kunnen komen. Het aantal mogelijkheden voor het optreden van polarisatie wordt nog verder uitgebreid door het optreden van allerlei combinaties van omzettingen van gepolariseerd licht, terwijl 'polarisatiecontrasten' (grote verschillen in polarisatie tussen objecten en hun achtergrond) de zichtbaarheid van verschijnselen op een soms verbreffende wijze kan beïnvloeden bij gebruik van filters. Zelfs 's nachts blijken er tenslotte nog lichtbronnen te vinden zijn die gepolariseerd zijn en een aparte klasse van waarnemingen mogelijk maken. Het zijn al deze mogelijkheden die in dit deel in detail beschreven zullen worden alsof wij gezamenlijk een wandeling door het vrije veld maken en ons hierbij wapenen met polarisatiefilters teneinde ook dat facet van de lichtverschijnselen in de natuur voor ons toegankelijk te maken.

De blauwe lucht en de wolken

12 De blauwe hemel

In onbewolkte toestand is de hemel blauw – een schitterend natuurverschijnsel. Als de blauwe hemel even zeldzaam was als een regenboog zou men zich veel bewuster zijn van zijn fraaiheid – nu realiseert men zich dat meestal pas goed na dagen van zwaarbewolkt weer.

Het blauwe licht is gestrooid zonlicht; dit licht wordt door de moleculen van de dampkring verstrooid. Buiten onze dampkring is de hemel dan ook inktzwart en zijn de sterren overdag zichtbaar, zoals ruimtevaarders uit ervaring weten. De dampkring is vrij dun (enkele tientallen kilometers) en als wij recht naar boven kijken ontmoet de blik veel minder luchtmoleculen dan wanneer wij naar de horizon kijken. Hierdoor komt er minder licht van boven dan van de horizon; recht boven ons is de hemel bovendien dieper blauw. Dit is sterker naarmate wij ons op een grotere hoogte bevinden, omdat de laag boven ons dan van geringer dikte is. Aan de horizon is de lucht lichter blauw en zweemt vaak naar witachtig. Een scherp waarnemer zal voorts bemerken dat de hemel op 90° van de zon minder licht geeft dan elders. Dit heeft niets te maken met de dikte van de verstrooiende laag, maar blijkt zijn oorsprong te hebben in de polarisatie- en strooilingseffecten van de luchtmoleculen zelf.



Plaat 9-10 Links: met een polarisatiefilter in de juiste stand ziet men het sterkst gepolariseerde deel van de blauwe lucht zich als een donkere band tegen de hemel aftekenen (§ 12). Rechts: weerkaatsing van dit licht resulteert in een donkere vlek op het water, zichtbaar zonder filter (§ 15, 48, 54). Beide foto's zijn groot-hoekopnamen.

De blauwe hemel is sterk tangentieel gepolariseerd (plaat 9-15). De sterkste polarisatie vindt men op 90° van de zon en kan bij schemering een maximale waarde van ongeveer 75% bereiken (§ 73). Kijkt men dichter naar de zon toe dan wordt de polarisatiegraad minder: op 45° van de zon is deze ten hoogste 30% en vlak bij de zon nul. Dezelfde

afname van de polarisatiegraad ziet men als men geleidelijk naar het gebied van de hemel recht tegenover de zon kijkt. De hoogste waarden van de polarisatiegraad blijken op te treden als de lucht zeer doorzichtig is; een heiige lucht is veel minder sterk gepolariseerd. Bij zonsopkomst of zonsondergang is de polarisatierichting nabij praktisch de gehele horizon verticaal gericht (zie ook § 14). Bij een hoge zonnestand hangt de polarisatierichting sterk af van de kompasstreek waarnaar wij kijken: tegenover de zon is deze bijvoorbeeld horizontaal gericht. De polarisatiegraad is dan nog zeer aanzienlijk en kan nog best zo'n 50-60% bedragen. Bekijkt men de hemel met een filter dat zodanig gericht is dat het licht maximaal uitgedoofd is (dus radieel ten opzichte van de zon), dan zien wij op 90° van de zon een indrukwekkende donkere band verschijnen die het gebied van de maximale polarisatie markeert (plaat 9). Op het oog schat men de breedte van deze band op ongeveer 30° ; hij is diepblauw van kleur. Op deze plaatsen kan de hemel in tangentiële richting wel acht keer helderder zijn dan in radiële! Sommige *dieren* (bijen, mieren e.d.) gebruiken niet de positie van de zon, maar de polarisatieverdeling van de hemel om zich te oriënteren: zij kunnen de polarisatie van het licht vele malen beter zien dan wij (§ 6), zij het, dat dit vermogen hoofdzakelijk beperkt schijnt te zijn tot ultraviolet licht. De *Vikingen* hanteerden trouwens bij afwezigheid van de zon eveneens deze wijze van navigeren: uit de polarisatierichting van een stukje blauwe hemel (of misschien ook die van mist of dunne bewolking, zie § 24) concludeerden zij waar de zon zich moest bevinden en zetten aan de hand daarvan hun koers uit. Als polarisatiefilter gebruikten zij een cordiérietkristal, dat in plaats van lichtgeel, blauw kleurt als het naar de zon toe wijst (dit als gevolg van de polarisatie van het licht). Zulke kristallen noemden zij 'zonnestenen'.

Met een filter in tangentiële stand merken wij dat de hemel min of meer egala verlicht is als men op één bepaalde hoogte boven de horizon kijkt; met een radieel filter zien wij het hierboven geschatte beeld. Zonder filter zien wij nu deze twee polarisatierichtingen bij elkaar opgeteld, hetgeen resulteert in een geringere lichtintensiteit op 90° van de zon.



De lichtminimum op 90° van de zon, dat wij al eerder noemden, is dus een gevolg van de sterke polarisatie van het hemellicht.



Plaat 11-13 *Heiige hemel bij zonsondergang*. Links gezien zonder, onder met polarisatiefilter in twee standen. Met dit filter kan men de hemelkleur doen omslaan van wit naar blauw, vooral op 90° van de zon (§ 13). Tevens verandert hier het contrast tussen lucht en wolken (§ 16).



13 Heiigheid aan de horizon: kleureffecten met een polaroid

Is er een lichte heiigheid in de atmosfeer, dan is de hemelkoepel bij de horizon witgekleurd in plaats van blauw. Ook nu is het licht sterk lineair gepolariseerd, vooral op 90° van de zon. Met een filter kan men dit licht dus uitdoven, maar het blijkt dat hierbij de kleur *omslaat* van witachtig naar diepblauw (plaat 11-13). Frappant is dit vooral bij een lage zonnestand.

Net als de gasmoleculen in de dampkring, blijken ook de minuscuile deeltjes die heiigheid veroorzaken gewoon *blauwachtig* licht te strooien. Deze strooiling is nu echter veel effectiever. Op de lange weg die dit strooilicht naar ons oog af moet leggen bestaat er een gerede kans dat het nogmaals, door andere deeltjes, verstrooid wordt. Door al deze strooilingen verliest dit licht geleidelijk zijn blauwe kleur, omdat juist dit licht de meeste kans loopt 'onderschept' te worden: het wordt dus steeds witter. Uit de kleurverschuiving die men met een polarisatiefilter waarneemt, zou men bijna concluderen dat de heiige laag voor radieel licht effectief gesproken minder 'dik' is, en daardoor blauwer is dan het tangentiële licht.

Afgezien van het bovenstaande is de polarisatieverdeling van een heiige lucht volkomen vergelijkbaar met die van een helderblauwe hemel, zij het dat de sterkte van de polarisatie doorgaans geringer is.

14 Schemering en negatieve polarisatie

De blauwe lucht bereikt zijn maximale polarisatie als de zon zich juist beneden de horizon bevindt. In deze situatie, en ook al bij een laagstaande zon, doet zich het merkwaardige voor dat de algehele belichting gebeurt door de blauwe, gepolariseerde lucht. De polarisatie is, zoals gezegd, maximaal op 90° van de zon en wordt naar de zon toe, of er vanaf, minder. De hoogst mogelijke polarisatiegraad zien wij optreden in het *zenit* (dat is het punt recht boven de waarnemer). Gemiddeld over de hele hemel is de polarisatiegraad ongeveer 40%. Zou men al het licht van de hemel in één punt concentreren, dan zou dit dus de polarisatiegraad zijn.

Verricht tijdens de schemer de volgende waarneming: ga de polarisatie van de hemel na, begin hierbij in het zenit en eindig aan het punt van de horizon dat zich recht tegenover de zon bevindt. Men ziet dan de tangentiële polarisatie afnemen, en de polarisatiegraad nul worden op een punt dat zich ongeveer 25° boven de horizon bevindt. Dichter naar de horizon neemt de polarisatiegraad weer toe, maar de richting is nu radieel geworden en staat dus loodrecht op de horizon! Dit omslaan van de polarisatierichting aan de hemel noemt men wel *negatieve polarisatie* (§ 4); deze bereikt een maximale polarisatiegraad tijdens schemer van ongeveer 20-30%. Het punt waar de polarisatiegraad nul is heet het *neutrale punt van Arago*. Het resultaat van deze negatieve polarisatie is, dat bijna overal langs de horizon de polarisatierichting verticaal is, ook daar waar men anders zou verwachten (zie fig. 19). Ook geïsoleerde wolken die zich tegenover de zon bevinden vertonen deze afwijkende polarisatierichting (zie § 23). Het omslaan van tangentiële naar radiële polarisatie van zenit naar horizon vormt een dankbaar waarnemingsobject voor de amateur; het effect vertoont zich het best met een polariscoop.

De verklaring van dit verschijnsel is, dat in dit gebied de hemel niet door de zon, maar door de blauwe lucht zelf belicht wordt. Een molecuul of deeltje 'ziet' dus alleen licht van de lucht, en niet van de zon. Voor hem trilt nu het licht van het zenit horizontaal en vanaf de horizon verticaal (fig. 20). Kwam er nu vanuit alle richtingen evenveel licht,

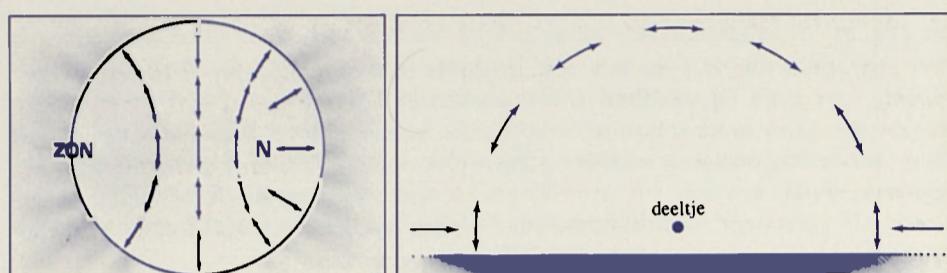


fig. 19 Polarisatierichtingen aan de hemelkoepel bij schemer. N is het neutrale punt van Arago.

fig. 20 Zo ziet een luchtdeeltje de polarisatie van het invallende licht bij schemer. Het meeste licht komt van de horizon.

dan zou al dit licht bij elkaar opgeteld toch ongepolariseerd zijn en zou het deeltje het ook zo doorgeven. Het meeste licht komt echter van de horizon: er is een voorkeursrichting. Het gestrooide licht is dus weer loodrecht op deze gemiddelde lichtbron, dus verticaal, gepolariseerd. Daar het invallend licht ook al gemiddeld verticaal gepolariseerd is (het verticale licht van de horizon 'wint' het van het horizontale licht uit het zenit) wordt de verticale polarisatie van het strooilicht nog versterkt. Deze effecten vat men meestal samen onder de noemer *meervoudige strooiing* (§ 86).

Het blijkt, dat ook in de richting van de zon zo'n gebied van negatieve polarisatie bestaat. Hier is echter de polarisatiegraad veel minder ($\sim 6\%$) omdat de belichting voor een veel groter deel direct door de zon gebeurt, ook na zonsondergang. De bijbehorende neutrale punten heten hier het *Babinetpunt* (boven de zon) en het *Brewsterpunt* (onder de zon). Dit soort punten zijn het onderwerp van uitgebreide studies geweest – het laatste punt is het moeilijkst te zien. Komt de zon boven de horizon, dan blijven beide gebieden van negatieve polarisatie gehandhaafd, maar hun polarisatiegraad is dan zo gering (ook tegenover de zon bedraagt hij niet meer dan 6%) dat ze voor ons niet langer waarneembaar zijn. Voor ons is het spectaculaire omslaan van polarisatierichting in het hemelgebied tegenover de zon bij schemering het meest belangwekkende verschijnsel met betrekking tot negatieve polarisatie.

15 Het waarnemen van de hemelpolarisatie zonder filters

Voor een scherp waarnemer is het mogelijk de sterke polarisatie van het hemellicht zonder hulpmiddelen of filters met het blote oog vast te stellen. Dit gaat meestal het best bij een lage zonnestand en kan op vier manieren gebeuren:

1. Bundels van Haidinger. De polarisatie van de hemel is sterk genoeg om deze te zien. Hiervoor kijkt men het best recht naar boven tijdens de schemering, terwijl men langzaam heen en weer draait, zodat de kin beurtelings bijv. naar het westen en zuiden wijst. Men ziet dan het kleine gelige figuurtje verschijnen dat aan het blote oog de aanwezigheid van gepolariseerd licht verraat (zie § 6); dit figuurtje wijst als een kompasnaald naar de zon toe. Als men zich niet ronddraait of het hoofd beweegt vervagen de bundels. Nu gebeurt dit echter niet omdat ze steeds op een ander deel van het netvlies verschijnen.

2. Weerkaatsing van het hemellicht op een water- of ander oppervlak (§ 7). Op 90° van de zon is de hemelpolarisatie nabij de horizon verticaal gericht bij lage zonnestand, terwijl water en andere oppervlakken juist de horizontale richtingen het best weerkaat-

sen (fig. 21). Men ziet dan een 'onnatuurlijke' donkere vlek in het water op 90° van de zon verschijnen die de polarisatie van het hemellicht aangeeft (plaat 10). Deze waarneming lukt goed bij stilstaand water, glanzende autodaken en, bij voorkeur natte, asfaltwegen; men moet er vrij sterk voor naar beneden kijken. Het water is daar dan meer doorzichtig omdat de schittering bijna afwezig is (zie ook § 48, 54). Ook bij lichtgolvende slootjes kan deze donkere vlek goed te zien zijn vooral als men er, bijvoorbeeld in een trein, met hoge snelheid langs rijdt. De vlek lijkt dan een min of meer driehoekige vorm te hebben.

3. Weerkaatsing op autoruiten. Deze zijn dubbelbrekend. Hier verschijnen gekleurde vlekken als gevolg van chromatische polarisatie (§ 93). Men heeft geen filter nodig om deze vlekken te zien, omdat het licht inwendig weerkaatst wordt door de ruit en de blauwe lucht als bron van gepolariseerd licht dient (fig. 22, zie ook § 52). Bij zware bewolking zijn de vlekken zo goed als niet te zien. Ook plastics en dergelijke stoffen vertonen dit effect. Het treedt ook op bij een hogere zonnestand; met een filter kan men het doorgaans nog flink versterken.

4. Tenslotte is de waarneming (zonder filter) dat de hemel op 90° van de zon het minste licht geeft (zie § 12) een indirekte manier om met het blote oog de polarisatie van het hemellicht te constateren.

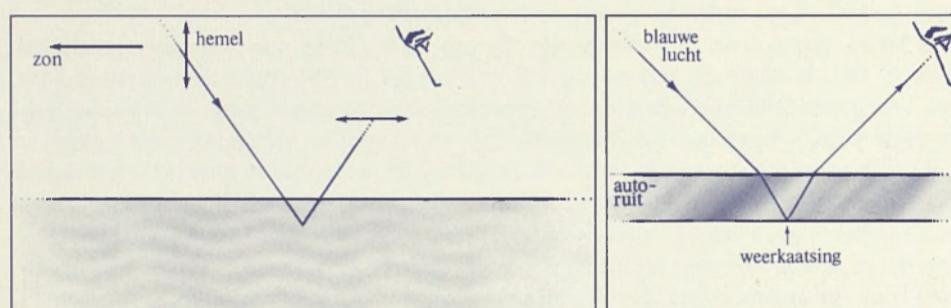


fig. 21 Het verticaal gepolariseerde hemellicht bij schemering wordt maar slecht weerkaatst door een (horizontaal) wateroppervlak.

fig. 22 Zonder filter zijn er door de samenwerking van de hemelpolarisatie en een weerkaatsing toch gekleurde vlekken te zien op autoruiten.

16 Halfbewolkte lucht en voorwerpen in de lucht: polarisatiecontrasten

Het fraaist manifesteert de polarisatie van het hemellicht zich wel als er zich wolkenbanken, zoals altocumulus, tegen de helderblauwe lucht aftekenen. Ook deze wolken zijn tangentieel gepolariseerd (zie § 20), maar de sterke van deze polarisatie is veel geringer dan die van de hemel. Het gevolg is, dat men bij het draaien van het filter het contrast wolken-lucht enorm kan zien veranderen. Het spectaculairst is dit wel als de wolken iets donkerder zijn dan de lucht en zich hiertegen dus grijsachtig aftekenen. Met een filter kan men dan dit contrast doen *omslaan* omdat dan in radiële richting het hemellicht zwakker is dan dat van de wolken! In plaats van grijsachtig ziet men deze wolk zich dan *wit* aftekenen tegen de diepblauwe hemel! Zonder twijfel behoren deze polarisatie-contrasten tot de meest verrassende verschijnselen die men met een filter aan de hemel kan waarnemen (zie plaat 11-13 en 14-15).

Bij waterwolken (die dus uit kleine druppeltjes bestaan) doet zich nog een verdere merkwaardigheid voor met betrekking tot dit soort verschijnselen. Deze wolken zijn



Plaat 14-15 Met een filter kan men vaak het contrast tussen de blauwe hemel en de wolken helemaal doen omslaan (§ 16). Het best lukt dit bij een vrij lage zonnestand op ongeveer 90° van de zon.



namelijk niet alleen op 90° , maar ook op ongeveer 145° van de zon behoorlijk sterk gepolariseerd (zie § 21). Deze polarisatie is hier echter sterker dan die van de hemelachtergrond, waardoor het contrast *tegengesteld* is aan dat op 90° van de zon. In radiële richting schijnen deze wolken op 90° wit en op 145° grijs; in tangentiële richting is dit omgekeerd! Dit is dus niet het gevolg van een tegengestelde polarisatierichting in deze twee gebieden van de hemel, maar van een tegengesteld polarisatiecontrast tussen de wolken en hun achtergrond. Bij ijswolken treedt deze sterke polarisatie op 145° en dus deze contrasttegenstelling niet op.

Door de blauwe lucht maximaal uit te doven met een polarisatiefilter worden voorwerpen in de lucht vaak beter zichtbaar. Dit geldt voor (ijle) wolken, de maan, rook, vogels, verre vliegtuigen en bergen, vliegers, stuifzand etc. Zie ook § 47. Andere objecten, zoals donkerder wolken, die in radiële richting ongeveer even helder zijn als de hemelachtergrond, zien wij juist beter in tangentiële richting.

17 De zichtbaarheid van sterren en planeten overdag

Na de zon en de maan zijn Venus, Jupiter en Sirius de helderste hemellichamen. Venus kan men zelfs op zeeniveau gemakkelijk met het blote oog ontwaren op klaarlichte dag, als hij op zijn grootste helderheid is. Men moet hiervoor echter wel precies weten waar hij zich bevindt, zodat het meestal aanbeveling verdient hem eerst met een verrekijker op te zoeken. Dit soort waarnemingen zijn het gemakkelijkst als de maan zich vlak bij de planeet bevindt en dus als referentiepunt kan dienen. Jupiter is veel moeilijker overdag te zien, maar het lukt toch wel om deze planeet bij een lage zonnestand met het blote oog waar te nemen; met een verrekijker gaat het ook bij een hoge zonnestand. Een zeer doorzichtige lucht is bij deze waarneming wel noodzakelijk. Sirius is tenslotte een grensgeval, maar ook dit hemellichaam moet men bij een lage zonnestand nog net kunnen zien.

Men zou verwachten, dat met een filter de situatie om sterren of planeten overdag te zien gunstiger is, omdat men speciaal op 90° van de zon het hemellicht aanzienlijk kan uitzoeken en deze hemellichamen zelf ongepolariseerd zijn. In de praktijk blijkt echter dat dit tegenvallt: het verzwakken van sterlicht met een filter blijkt zijn waarnemingsomstandigheden meer dan evenredig ongunstig te maken! De ervaring leert nu inderdaad dat Jupiter vlak na zonsopkomst nauwelijks beter met als zonder polarisatiefilter te zien is, zelfs op 90° van de zon. Bij schemering is de situatie nog ongunstiger en neemt de zichtbaarheid eerder af dan toe met een filter. Bij Venus heeft een dergelijke waarneming helemaal geen zin, omdat deze planeet zich nooit verder dan 46° van de zon kan bevinden en zich dus nooit in het sterkst gepolariseerde deel van de hemel bevindt.

Het meeste nut heeft een polarisatiefilter waarschijnlijk bij waarnemingen overdag, als de zon niet te hoog staat. Gebruik hiervoor een zo doorzichtig mogelijk filter; ieder extra lichtverlies is ongunstig. Theoretisch zouden dan Jupiter en misschien Sirius nog net te zien moeten zijn. Het waarnemen van Sirius kan men het beste rond oktober proberen, als hij zich 90° ten westen van de zon bevindt en men hem in de ochtendschemer kan volgen.

18 De hemel bij maanlicht

Ook deze is blauw, en op dezelfde wijze en sterkte gepolariseerd als bij zonlicht! Bij het zwakke maanlicht is het oog echter vrijwel ongevoelig voor kleuren en ook minder

gevoelig voor helderheidscontrasten. Hierdoor ziet men de 'blauwe' lucht slechts als een witachtig waas dat voor de sterren hangt, terwijl ook de polarisatie minder lijkt te zijn. Met een filter of polariscoop kan men toch vaststellen dat de polarisatie van het hemellicht aanzienlijk is. Bij volle maan gaat dit beter dan bij eerste kwartier, omdat het maanlicht in het laatste geval nog eens een factor negen zwakker is en het hemellicht dus ook. Met een filter stelt men gemakkelijk vast dat de karakteristieken van de polarisatie identiek zijn als bij zonlicht, en bijv. maximaal is op 90° ervan.

De polarisatie van het hemellicht kan men in dit geval fraai afmeten aan de zichtbaarheid van de sterren (die ongepolariseerd zijn); men kan gemakkelijk constateren dat een filter in radiële richting de sterren beter vertoont dan in tangentiële richting. Men ziet dus meer sterren. Met het blote oog ziet men echter nog meer sterren; het gebruik van een filter is onder deze omstandigheden niet bevorderlijk voor de zichtbaarheid ervan. Ook hieraan kan men constateren dat de zichtbaarheid van sterren door filters of een zonnebril veel sterker achteruit loopt dan men in de eerste instantie zou denken, zoals wij ook in § 17 zagen.

19 Totale zonsverduistering

Dit is een van de meest imponerende natuurverschijnselen, helaas zeer zeldzaam op één bepaalde plaats op aarde. Men moet doorgaans een reis maken wil men er een aanschouwen. Tijdens zo'n verduistering wordt de zon voor ten hoogste enkele minuten *geheel* afgedekt door de maan, hetgeen het beeld van de hemel op slag volkomen verandert.

Als het laatste deel van de zonneschijf achter de maan verdwijnt ondergaat men de gewaarwording of 'het licht uitgaat': in één enkele seconde is het *zó* donker alsof het een klein uur na zonsondergang is (de zon $5\text{--}7^\circ$ onder de horizon). Tegelijk steekt er een bries op: de eclipswind. Inplaats van de witte zonneschijf zien wij nu een inktzwarte schijf aan de hemel, met hier omheen een zilverwitte stralenkrans: de *corona*. Deze is ongeveer zo helder als de volle maan. Het licht van deze corona is verstrooid zonlicht; deze verstrooiing gebeurt tegen de losse elektronen in de wereldruimte die de zon als een wolk omringen. Dit strooilight is sterk gepolariseerd (§ 73); de maximale polarisatiegraad van de corona blijkt ongeveer 40% te bedragen op een kwart zonsdiameter van de zonnerand. Op grotere afstand van de zon wordt de polarisatiegraad geleidelijk minder. Deze polarisatie is tangentiel gericht. Als men nu met een filter in verschillende standen recht in de corona kijkt, ziet men zijn vorm inderdaad duidelijk *veranderen* (plaat 16-17). Over de gehele corona genomen heffen de polarisatierichtingen elkaar weer ongeveer op, zodat het totale *schijnsel* ervan nauwelijks polarisatie vertoont. De hemel zelf licht echter niet op door dit coronalicht, want dan zou het nog eens duizend keer donkerder moeten zijn. De belichting komt van *buiten* het gebied waar de totaliteit plaatsvindt en waar de zon dus nog volop schijnt: omdat de totaliteitsgebieden zo klein zijn is dit nooit verder dan 130 km weg. Het is in feite een bijzondere vorm van schemering waar wij nu mee te doen hebben. Het meeste licht zien wij bij de horizon, waar nog delen van de atmosfeer direct door de zon beschinen worden; het donkerst is het in het zenit. Het is vaak zo donker dat de helderste sterren te zien zijn.

Zoals de helderheid en lichtverdeling van de hemel op slag verandert, zo verandert ook zijn polarisatieverdeling. De polarisatie is nu niet langer meer tangentieel ten opzichte van de zon, omdat deze nu niet meer als lichtbron dient. Nu komt het licht van de horizon en is afkomstig van gebieden waar de zon niet totaal verduisterd is (fig. 23). Juist

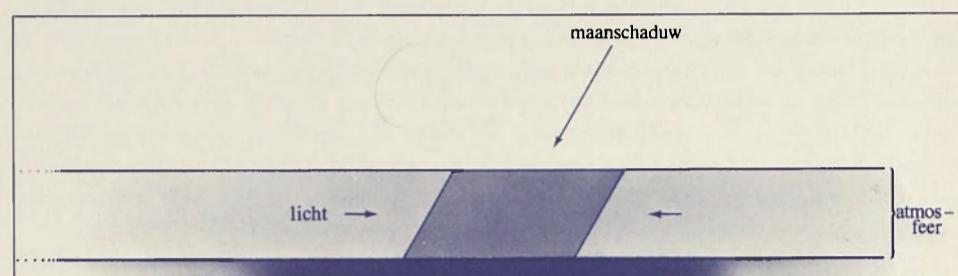
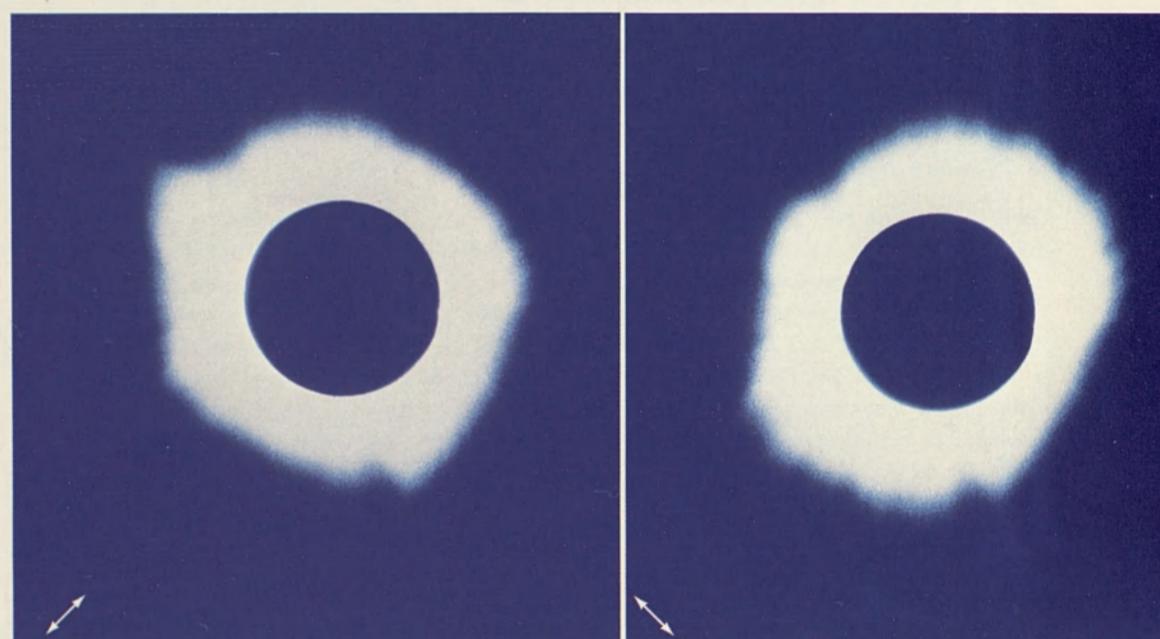


fig. 23 Tijdens een totale zonsverduistering licht de hemel op door strooilight dat van buiten de totaliteitszone afkomstig is.



Plaat 16-17 De zonnecorona, zichtbaar tijdens totale zonsverduisteringen, is sterk tangentieel gepolariseerd. Met een filter kan men dus zijn vorm veranderen (§ 19). (Foto Sterrenwacht Utrecht, 9 maart 1970)

zoals bij gewone schemering kan men de luchtbron dus op de horizon denken, en dit maakt het waarschijnlijk dat de polarisatie overwegend verticaal gericht zal zijn. In feite treedt er dus een 'negatieve' polarisatie op (§ 14), maar nu manifesteert ze zich over de hele hemel, uitgezonderd in het zenit waar de polarisatie nul moet zijn. Waarschijnlijk hangt de polarisatierichting toch enigszins af van de zonshoogte en de richting waarin men kijkt, omdat de polarisatie van de 'lichtbron' (het gebied buiten de totaliteit) nu niet noodzakelijk verticaal hoeft te zijn. De grootste polarisatiegraad heeft de hemel nu op een hoogte van ongeveer 30° , deze zal naar schatting ongeveer 30-40% kunnen bedragen. De verdeling van de polarisatiesterkte is in principe symmetrisch om het zenit. Na luttele minuten is de totaliteit ten einde en de belichting weer normaal. Wel zeer kort om alle verschijnselen in zich op te kunnen nemen. Het duurt dan meestal eeuwen, voor er op dezelfde plaats weer een totale zonsverduistering te zien zal zijn.

20 De polarisatie van wolken, overzicht

Wolkenlicht is lineair gepolariseerd; de polarisatie hangt af van de belichting ervan. Als de wolkendeeltjes direct door de zon (of maan) beschenen worden (halfbewolkte lucht, dunne wolken of mist), dan is de polarisatierichting tangentieel, juist zoals bij de blauwe lucht. De polarisatiegraad is echter doorgaans aanzienlijk geringer. Bij schemering of zwaar bewolkte lucht ziet men afwijkende polarisatierichtingen optreden.

Er zijn zeer vele wolkensoorten, maar de polarisatie van het wolkenlicht hangt, behalve van het bovengenoemde, slechts af van de samenstelling van de wolk (ijskristallen of waterdruppeltjes) en van de grootte van deze elementen.

Aangezien de polarisatierichting van wolken dezelfde is als van de blauwe hemel, maar de sterkte aanzienlijk afwijkt, ziet men door een filter sterke contrasten optreden tussen de polarisatie van de wolken en die van de lucht (§ 16). De tangentiële polarisatie van het witte wolkenlicht zelf wordt hierdoor enigszins gecamoufleerd: men moet scherp opletten om deze vast te stellen. Met een polariscoop heeft men echter geen last van dit effect en kan men de tangentiële wolkenpolarisatie gemakkelijk zien. Wel kan men met een filter een *verkleuring* van de wolken vaststellen, vooral op 90° van de zon: als het wolkenlicht maximaal uitgedoofd is, wordt de wolk wat geler. Deze kleurverandering is het beste te zien als de zon niet te hoog staat en de atmosfeer wat troebel is. De oorzaak van dit effect is gelegen in de luchtkolom die zich tussen de wolk en de waarnemer bevindt: deze geeft blauwig strooilicht af, hetgeen de tint van verre voorwerpen wat verandert (zie ook § 47). Uitdoving van dit tangentieel gepolariseerde strooilicht veroorzaakt dus een geler worden van de achtergrond, in dit geval de wolk.

21 Ijswolken en waterwolken

Globaal gesproken zijn deze op dezelfde wijze gepolariseerd: tangentieel met een grootste polarisatiegraad op ongeveer 90° van de zon, juist zoals de blauwe lucht. De maximale polarisatiegraad bedraagt echter niet meer dan ruwweg 40%; de polarisatie neemt verder af als men naar de zon toe of er van af kijkt.

Er is één frappant verschil tussen de polarisatie van waterwolken en ijswolken. Op ongeveer 145° van de zon vertonen de laatste namelijk een scherpe toename van de polarisatie, die niet optreedt bij ijswolken! De polarisatiegraad kan daar gemakkelijk 60% bedragen en is dus zelfs sterker dan op 90° van de zon; met een filter zien wij de wolken duidelijk oplichten en uitdoven in dit gebied van de hemel. Zelfs zonder filters zien wij dat er in dit gebied van de hemel 'iets aan de hand is', de wolken zijn daar merkbaar helderder. Dit constateert men het beste bij een min of meer gelijkmataige bewolking, zoals altocumulusbanken (zie ook § 30 en plaat 30 op blz. 53).

De oorzaak van dit verschijnsel is gelegen in *regenboogstrooing*: in de minuscuile druppeltjes vomt zich evengoed een regenboog als in regendruppels, maar hier is hij geheel wit van kleur en valt dus niet zo op. Wel vertoont hij dezelfde polarisatie die bij de regenboog zelf voorkomt (zie § 30). Natuurlijk zien wij het gebied aan de hemel waar dit optreedt alleen bij een vrij laagstaande zon, omdat het zich anders onder de horizon bevindt. Deze sterke polarisatie geeft aanleiding tot afwijkende polarisatiecontrasten tussen de hemel en de wolken, zoals beschreven in § 16.

Omdat de polarisatiegraad van wolken nogal kan wisselen moet men het bovenstaande opvatten als een algemene beschouwing; men kan vaak vaststellen dat de polarisatie

bijvoorbeeld geringer is naarmate de wolken dikker zijn. Voorts treedt er in de richting van de zon ook wel radiële polarisatie op ten gevolge van brekingseffecten. In het algemeen is deze laatste polarisatie zwak en moeilijk waarneembaar; de bovenstaande schematische beschrijving van de wolkenpolarisatie sluit het best aan bij datgene wat men door een filter ook werkelijk kan zien.

22 Polarisatiecontrasten tussen ijs- en waterwolken. Stof-, zandwolken en rook

De afwijkende polarisatie tussen ijs- en waterwolken op 145° van de zon kan men schitterend waarnemen als een lage waterwolk zich voor een ijswolk bevindt. Als ijswolk kan bijvoorbeeld cirrus dienen, maar ook de helderwitte cumulonimbuswolken bestaan vaak voor zo'n groot deel uit ijssdeeltjes dat hun polarisatie zich ook zo gedraagt. Uit het oogpunt van polarisatie kan men deze wolk dus als een ijswolk opvatten. Door een tangentieel gericht filter zien wij nu dat de waterwolk en de ijswolk erachter ongeveer even helder zijn, maar in radiële richting dooft alleen de waterwolk aanzienlijk uit. Hij tekent zich dan grijsachtig af voor de helderwitte cumulonimbus. Deze vorm van polarisatiecontrasten behoort, naast die tussen wolken en lucht (§ 16) tot de duidelijkste die er in de natuur te zien zijn. Om deze te zien moet men echter wel goed weten in welke richting men moet kijken: op 145° van de zon. Elders is het niet te zien.

Stof- en *zandwolken* vertonen een polarisatie die ruwweg dezelfde is als die van ijswolken, alleen is de polarisatiegraad hier vaak nog geringer. Hier treden dus polarisatie-contrasten op met de wolken in de lucht: men zal ervaren dat deze wolken beter te zien zijn met een filter in radiële richting. Zandwolken kan men soms op het strand fraai waarnemen als er een flinke wind in de richting van het strand staat en men langs dit strand in de verte kijkt. Zelfs bij *rook* kan wel polarisatie optreden op 90° van de zon. Tracht dit eens te zien!

23 Wolkenpolarisatie en negatieve wolkenpolarisatie bij schemering

Na zonsondergang worden de wolken niet meer direct door de zon beschenen. Hun kleur verandert dan ook, van helderwit naar blauwachtig grijs. Immers, de belichting vindt nu alzijdig plaats vanuit de blauwe, gepolariseerde hemel. Het helderheidscontrast tussen de lucht en de wolken is geringer geworden. Hoe lager de wolken, des te eerder vindt deze metamorfose plaats: hoge bewolking wordt langer door de zon beschenen (plaat 18 op blz. 44).

Polarisatieverschillen tussen ijs- en waterwolken zijn nu verdwenen. De wolken nemen in sterke mate de polarisatie van de blauwe lucht over; de polarisatiecontrasten tussen lucht en wolken (§ 16) verdwijnen. In het gebied tegenover de zon vertonen de wolken negatieve polarisatie; deze is zelfs meer uitgesproken dan die van de blauwe lucht zelf (§ 14). Dit is niet zo verwonderlijk: bij de onbewolkte lucht zien wij het stroolicht van een lange kolom lucht, waarbij ieder deeltje in meerdere of mindere mate negatieve polarisatie kan vertonen, al naar gelang de afstand tot de waarnemer. Wolken daarentegen zijn helder en ondoorzichtig, en men kan ze dus opvatten als één deeltje op grote afstand: alleen van dit 'deeltje' zien wij de polarisatiekarakteristiek. In feite geeft een wolk hierdoor een beter beeld van negatieve polarisatie dan de blauwe lucht zelf (zie § 14, 86 en fig. 20 op blz. 35).

Tracht bij deze wolken het neutrale Aragopunt te vinden (§ 14); het zal zich doorgaans

hoger boven de horizon bevinden dan bij de blauwe lucht. Het best slaagt zo'n waarneming met bijvoorbeeld cumuluswolken, die zich soms zo fraai in banken kunnen groeperen.

24 Zware bewolking

Een zwaar bewolkte lucht werkt doorgaans weinig bevorderlijk op het humeur van velen. 'Let in de straten bij avondschemering en betrokken lucht op het gelaat van de mannen en vrouwen, hoeveel liefelijkheid en zachtheid erover ligt gespreid', schrijft Leonardo da Vinci.

Bij zwaar bewolkt weer is de belichting min of meer alzijdig; de polarisatie van de wolken is dan voor een groot deel verdwenen. Toch komt er nog wat meer licht vanuit het zenit, waar de wolkenlaag het dunst lijkt, dan van de horizon: dit is dus de tegenhanger van de lichtverdeling van een onbewolkte lucht bij schemer. Hierdoor is het wolkenlicht aan de horizon toch gepolariseerd: de richting is *horizontaal*. De polarisatiegraad is maximaal vlak boven de horizon en kan daar zo'n 10-20% bedragen. Deze hoogste polarisatiegraad zien we bij een dikke bewolking en een redelijk zicht optreden. Hoger in de lucht neemt de polarisatiegraad snel af en is boven ongeveer 10° al niet meer waarneembaar; in het zenit (de 'gemiddelde lichtbron' bij elke zonnestand) moet hij altijd nul zijn. De polarisatie aan de horizon kan men het beste zien als het resultaat van strooiling, waarbij het licht uit deze gemiddelde lichtbron afkomstig is. De polarisatierichting is weer tangentieel, nu dus horizontaal (§ 86).

Deze markante polarisatie zien wij alleen maar optreden als de wolkenlaag kilometers dik is, zoals bij een frontpassage. Dunnere wolken, zoals stratocumulus, stratus of een mistlaag vertonen dit soort polarisatie niet, maar zijn gewoon tangentieel ten opzichte van de zon gepolariseerd (§ 21) alsof hun deeltjes nog direct door de zon beschinen worden: de straling is dan nog niet diffus genoeg om alzijdige strooiling en het bovenstaande polarisatiepatroon op te wekken. Anderzijds vertonen zeer dikke wolken met slecht zicht, dichte regen of sneeuw (ook een soort wolk) nauwelijks of geen polarisatie: hier is de belichting zo sterk alzijdig dat er van een voorkeursrichting van het licht, en dus van polarisatie, nauwelijks sprake kan zijn.

25 Lichtende nachtwolken en parelmoerwolken

Deze twee wolkensoorten willen wij hier apart bespreken; ze zijn pas na zonsondergang te zien. Beide bevinden zich op een uitzonderlijke hoogte: de stratosferische parelmoerwolken op ongeveer 25 km en de lichtende nachtwolken zelfs op 80 km. Deze laatste bevinden zich in de mesosfeer. Alle andere wolken zijn troposferisch en kunnen zich dus nooit hoger dan 12 km boven het aardoppervlak uitstrekken.

Lichtende nachtwolken (plaat 19) kondigen hun verschijnen vaak aan door een abnormaal heldere, geelachtige schemer in de richting van de reeds ondergegane zon, bij een doorzichtige hemel. Dan verschijnen er tegen de donkere hemel golvende, zijdeachtige lichtgevende wolken. Door hun grote hoogte worden zij nog lang door de zon beschinen; pas als deze zich dieper dan 15° beneden de horizon bevindt is dit niet meer mogelijk. Hun kleur is blauwachtig zilver; zij bevinden zich doorgaans laag boven de horizon aan hetzelfde gedeelte van de hemel als de ondergegane zon. Het zijn typische zomerwolken: ze worden praktisch alleen maar in de maanden mei tot augustus gezien.

Kennelijk is alleen dan de opbouw van de hoogste atmosfeer gunstig. Het meest frequent zijn ze op noordelijke breedten; bij ons zijn ze in juli op ongeveer 25% van de heldere nachten te zien. Fraaier complexen zijn natuurlijk zeldzamer. Door hun grote ijlheid zijn ze overdag nooit te zien.

Evenals bij andere wolken, is ook het licht van deze bijzondere wolkenvorm tangentieel gepolariseerd. Deze polarisatie is echter veel sterker en bereikt een maximale polarisatiegraad van niet minder dan 96% op 90° van de zon. Dit is zelfs nog sterker dan de blauwe lucht. Niettemin is deze polarisatie niet gemakkelijk te zien, omdat de lichtsterkte van deze geheimzinnige wolken zo gering is. Bovendien zien wij ze slechts zelden op afstanden groter dan 50° van de zon (hier is de polarisatiegraad toch nog ongeveer 50%). Anderzijds verstoort de polarisatie van het hemellicht deze waarneming maar weinig, omdat het al zo donker is dat de hemel nog maar weinig licht geeft. Het beste kan men dit soort waarnemingen verrichten op een zo groot mogelijke hoekafstand van de zon: hoe dichter men naar de zon kijkt, des te geringer is de polarisatiegraad.

De schitterende parelmoerwolken komen in onze streken helaas niet voor. Deze verschijnen aan de lijzijde van hogge bergen, als er een sterke luchstroming loodrecht op staat. In Noorwegen, Schotland en aan de Zuidpool worden deze wolken wel regelmatig waargenomen. Het fraaist zijn ze te zien als de zon onder is, maar de stratosfeer nog kan beschijnen; men ziet ze dan op zo'n 20° boogafstand van de zon.

Kenmerkend aan deze wolken is hun kleurenpracht. Ze vertonen inderdaad parelmoerachtige kleurschakeringen. Dit wolkenlicht is gepolariseerd; volgens Minnaert veranderen de kleuren als men de wolken door een polaroid bekijkt en het filter draait! Iets dergeliks kan men verwachten als de wolkendeeltjes afmetingen van ongeveer $0,8 \mu$ hebben: de polarisatie is dan al aanzienlijk op een kleine hoekafstand van de zon en blijkt dan zeer sterk kleur- en hoekafhankelijk te zijn (§ 86). Waarschijnlijk is ook hier de overwegende polarisatierichting tangentieel ten opzichte van de zon. Bij een reis naar Noorwegen mag men niet verzuimen dit unieke verschijnsel te trachten waar te nemen, dat men bij ons helaas nooit zal zien. – De kleurige iriserende wolken, die men hier wèl regelmatig kan waarnemen, zijn ongepolariseerd (§ 43).



Plaat 18-19 Links: na zonsondergang verandert de kleur, en hiermee de polarisatietoestand van de wolken (§ 23). Rechts: in een zomernacht zijn regelmatig de hoge lichtende nachtwolken te zien. Hun licht is gepolariseerd (§ 25).

Regenbogen, kransen, halo's, glories en aanverwante verschijnselen

26 Inleiding: de optische verschijnselen aan de hemel

De verschijnselen die in dit hoofdstuk ter sprake komen nemen een wel zeer speciale plaats in, door hun grote variatie en kleurrijkdom. De 'jacht' op dit soort verschijnselen is voor iedere natuurliefhebber dan ook een bijzonder genoegen. Meestal verschijnen ze als *vlekken*, *bogen* of cirkels ('kringen') aan de hemel; de cirkels hebben doorgaans de zon, of zijn tegenpunt*, tot centrum. Veel van deze verschijnselen vertonen kleurschakeringen als regenbogen; enkele overtreffen deze zelfs nog in kleurenpracht.

Het ontstaan van deze '*optische verschijnselen*' vindt zijn oorzaak in de aanwezigheid van andere deeltjes dan gasmoleculen in de lucht: waterdruppels en ijskristallen. Deze strooien het zonlicht veel effectiever dan de moleculen, die verantwoordelijk zijn voor het blauwe hemellicht. De helderheid van dit licht is zóveel groter, dat er zich maar een vrij geringe hoeveelheid in de dampkring behoeft te bevinden om het blauwe hemellicht volkomen te overstralen. Het aanzien van de hemelkoepel verandert al snel van blauw in melkwit als deze deeltjes in de atmosfeer komen; de waarnemer ervaart dit als het verschijnen van (ijle) bewolking.

Het zijn dan niet meer de strooilingseigenschappen van de moleculen, maar de optische eigenschappen van de waterdruppeltjes of ijskristalletjes die de karakteristieken van het uiterlijk van de hemel bepalen. In deze deeltjes zijn er vele wegen denkbaar die een lichtstraal af kan leggen voordat hij weer uitreedt. Een aantal hiervan geeft aanleiding tot 'kleurschifting' van het zonlicht, zoals wij die ook bij glazen asbakken, diamanten of transparante prisma's (§ 51) kennen, met hier als gevolg het verschijnen van *regenbogen*, *halo's* en andere kleurrijke verschijnselen aan de hemel. De kleurschifting wordt dus op een bepaald gedeelte van de hemel geprojecteerd. De *aard* van het optredend verschijnsel is natuurlijk gebonden aan het soort deeltjes dat zich in de lucht bevindt: de optische eigenschappen van druppels of ijskristallen zijn niet identiek. Een regenboog zal men bijvoorbeeld nooit zien verschijnen in een ijswolk, maar alleen in waterdruppels.

De *polarisatie* van deze optische verschijnselen verschilt sterk van verschijnsel tot verschijnsel. Sommige zijn zeer sterk tangentieel t.o.v. de zon gepolariseerd, als er bijvoorbeeld weerkaatsing nabij de Brewster hoek (§ 74) een rol speelt in hun ontstaanswijze. Weer andere vertonen radiële polarisatie of zijn niet of nauwelijks gepolariseerd;

* Het tegenpunt is het punt recht tegenover de zon. Het bevindt zich dus even ver onder de horizon als de zon erboven is, precies op de plaats waar men zich de ogen van zijn schaduw moet denken.

dit laatste gebeurt als bijvoorbeeld buiging of totale reflectie bepalend zijn voor het ontstaan. Als geheel genomen vertonen de optische verschijnselen evenwel een bijzonder grote variatie in polarisatie-effecten. Het lijkt of de natuur ons in deze verschijnselen een tip oplicht van al zijn mogelijkheden het ongepolariseerde zonlicht om te zetten in lineair gepolariseerd licht via vele mechanismen, waarvan sommige verder alleen in laboratoriumomstandigheden optreden. Niet alleen hun grote verscheidenheid, hun soms bizarre vorm en de veelal enorme kleurenpracht, maar zeker ook hun geweldige polarisatierijkdom maken deze optische verschijnselen tot de dankbaarste waarnemings-objecten die in de vrije natuur kunnen optreden.

Gelukkig zijn een aantal van deze verschijnselen veel minder zeldzaam dan men over het algemeen denkt. De oorzaak hiervan is, paradoxaal genoeg, gelegen in hun vaak enorme lichtsterkte, die ons dan verhindert er met het blote oog direct in te kijken. Dit geldt vooral voor die verschijnselen, die zich dicht bij de zon bevinden. Met een behoorlijke zonnebril is het waarnemen dan veel gemakkelijker en heeft men dus een grotere kans ze te zien. Een enkel optisch verschijnsel vormt zich echter *zó* dicht bij de lichtbron, dat men hier bijna recht in moet kijken. Dit is bijvoorbeeld het geval met de krans (§ 43). Deze kan men daarom beter bij de maan dan bij de zon observeren.

27 Regenbogen (plaat 20-21)

Dit is wel het meest bekende optische verschijnsel aan de hemel. Een regenboog ontstaat als waterdruppels direct door de zon beschenen worden en vertonen zich als een gekleurde band op ongeveer 138° van de zon, dus op 42° van het tegenpunt hiervan. Bij een zonshoogte groter dan 42° is de boog dus niet aan de hemel te zien. Deze (hoofd) regenboog is rood van buiten en blauw van binnen; de binnenvleugel kleuren zijn doorgaans wat fletser dan het rood. Hier binnen herhalen de kleuren zich soms nog één of meerdere keren: dit zijn de zogenaamde 'overtallige bogen'. Binnen de regenboog is de lucht duidelijk helderder dan erbuiten. Op ongeveer 8° buiten deze regenboog ziet men wel een tweede boog verschijnen: de nevenregenboog. Deze is aanzienlijk zwakker dan de hoofdregenboog. Zijn kleurvolgorde is omgekeerd; buiten deze boog is de lucht weer wat helderder dan er binnen. Meestal ziet men slechts stukken van deze regenbogen, omdat niet de hele hemel met druppels gevuld is, of omdat de druppels niet alle door de zon beschenen worden. Omgekeerd kan men vanaf een hoge toren de regenboog soms als een volledige cirkel zien!

Regenbogen zien wij het meest in buien, dus onder cumulonimbuswolken optreden. Maar ook na een frontpassage zien wij ze soms schitterend in de wegtrekkende regen verschijnen, als dit front tenminste gevuld wordt door felle opklaringen. Voorts vertonen zij zich in watervalen, geysers, tuinsproeiers, fonteinen, bloemenspuitjes, opspattend zeewater, douchecellen, in druppels in het gras (de 'dauwboog', plaat 22) of op spinrag en op alle andere plaatsen waar waterdruppels direct door de zon beschenen worden. Tussen al deze bogen is natuurlijk geen enkel principieel verschil: de kleurvolgorde is altijd gelijk, en ze verschijnen op 42° van het tegenpunt van de zon; alleen voor zoutwaterdruppels blijkt deze afstand ongeveer een graad kleiner te zijn. Men moet dus altijd zorgen met de zon in de rug in de juiste richting te kijken. De kleuren van de regenboog zijn natuurlijk dezelfde kleuren waaruit de lichtbron is opgebouwd: bij een rode zonsondergang ziet men alleen maar de 'rode regenboog' (plaat 23).

Regenbogen ziet men ook wel optreden bij kunstmatige lichtbronnen of bij maanlicht;

zeker in dit laatste geval lijkt de boog echter wit ten gevolge van de geringe kleurvoeligheid van ons oog bij geringe lichtsterkte. Hij is zelfs eenmaal gezien tijdens een totale zonsverduistering, waarbij als lichtbron de zonncorona dienst deed! Toen waren zijn kleuren roze en groen, overeenkomend met de helderste emissielijnen van de corona.

Hoe de regenboog ook tot stand komt, zijn licht is altijd zeer sterk tangentieel gepolariseerd. De polarisatiegraad van zowel de hoofd- als de nevenregenboog is zo hoog, dat men ze *geheel* kan 'wegdraaien' met een filter (plaat 24-26)! In de andere stand verschijnen de bogen juist zeer helder. Vaak ziet men dan ook de nevenregenboog verschijnen, terwijl men die dan nog niet met het blote oog heeft opgemerkt. Het opsporen van zwakke regenbogen, zoals de rode regenboog of de dauwboog wordt aanzienlijk gemakkelijker met zo'n filter. Deze sterke polarisatie vindt zijn oorzaak in de weg die de regenboog vormende lichtstralen door de druppels moeten aleggen. In geval van de hoofdregenboog ondergaan deze namelijk altijd één inwendige reflectie tegen de achterzijde van de druppel (fig. 24); bij de nevenregenboog gebeurt dit tweemaal. Toevallig vinden deze weerkaatsingen erg dicht bij de Brewster hoek plaats (§ 74), zodat het licht hierbij zeer sterk gepolariseerd wordt. Anders dan bij uitwendige weerkaatsingen verandert dit licht nu echter niet ongeveer 90° van richting, omdat de brekingen de richting van deze lichtstralen zo sterk veranderen! Hierdoor verschijnt dit sterk gepolariseerde verschijnsel veel verder dan 90° van de zon af (zie ook § 75). De polarisatiegraad van de nevenregenboog blijkt iets minder sterk te zijn dan die van de hoofdregenboog (96% tegen 90%). In de praktijk betekent dit echter alleen maar een volledig verdwijnen van beide regenbogen met een radieel gericht filter.

De zeer sterke polarisatie van het regenbooglicht voert ons dus tot een markante tegenstelling: met een tangentieel gericht filter zijn zij van een schitterende helderheid, maar met een radieel gericht filter verdwijnen ze volkomen.

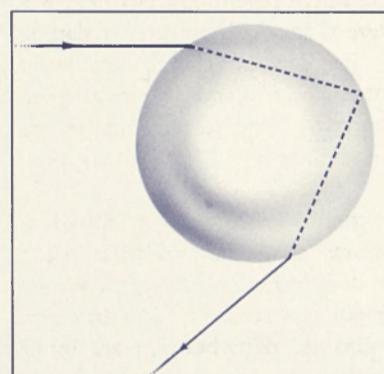


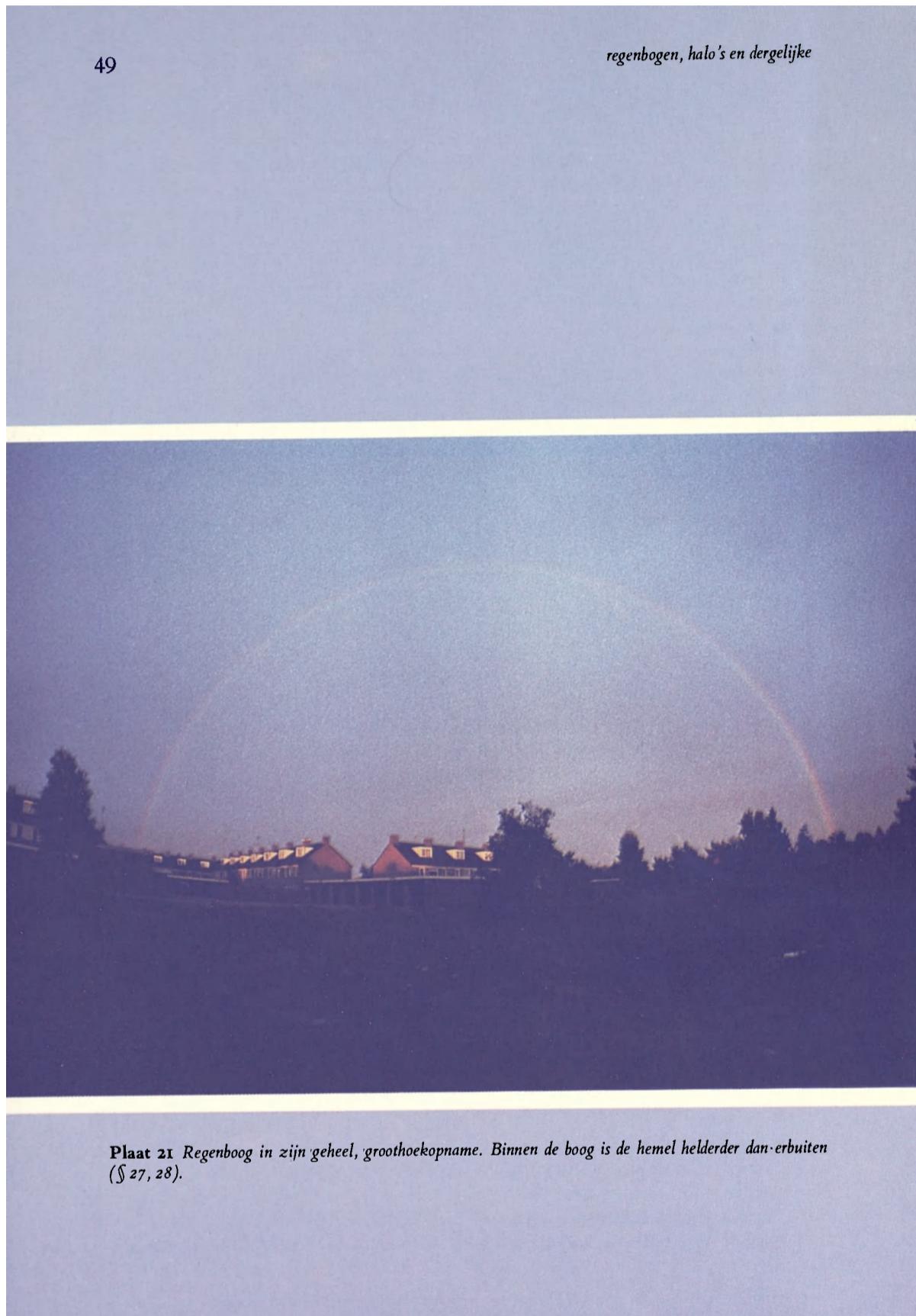
fig. 24 Stralengang door een regendruppel die verantwoordelijk is voor de vorming van de hoofdregenboog.

28 De lucht nabij regenbogen

Binnen de hoofdregenboog en buiten de nevenregenboog geeft de hemel duidelijk meer licht dan ertussen; het meeste licht komt van het deel binnen de hoofdregenboog. Het gebied tussen de regenbogen is verreweg het donkerste gedeelte van de lucht bij regen (plaat 20). Men noemt deze donkere band de 'band van Alexander'; deze is genoemd naar zijn ontdekker, Alexander van Aphrodisius (200 n.C.).



Plaat 20 Dubbele regenboog. De bogen hebben een tegengestelde kleurvolgorde. Tussen de bogen is de hemel zeer donker, dit is de 'band van Alexander' (§ 28). Foto G. Doeksen.



Plaat 21 Regenboog in zijn geheel, groothoekopname. Binnen de boog is de hemel helderder dan er buiten ($\S\ 27, 28$).

De extra verlichting van de lucht binnen de regenboog (of buiten de nevenregenboog) komt tot stand door eenzelfde lichtweg door de druppel heen, die verantwoordelijk is voor het verschijnen van de aangrenzende regenboog. In feite is de regenboog slechts de *begrenzing* van een helder gebied aan de hemel dat door een specifieke combinatie van brekingen en weerkaatsingen in regendruppels oplicht, en is dus geen op zichzelf staand verschijnsel (zie plaat 21). Deze grens verschilt van kleur tot kleur en vindt zijn uiterste begrenzing in het rood. Omdat bovendien de helderheid van zo'n verlicht gebied sterk toeneemt in de richting van deze grens, manifesteert deze zich als een heldere, fraai gekleurde band: de regenboog.

Het licht *binnen* de hoofdregenboog komt op dezelfde wijze tot stand als dat van de regenboog zelf, zodat ook de polarisatie ervan dezelfde is. Met een radieel gericht filter verdwijnt dus niet alleen de regenboog, maar ook de extra oplichting ter binnenzijde hiervan. De band van Alexander is dan niet meer te zien, omdat nu het hele gebied waar de regenboog is uitgedoofd hetzelfde donkere, egaalgrijze licht vertoont. In feite zien wij nu bijna een lichtverdeling aan de hemelkoepel die zou optreden als de waterdruppels zwart en ondoorzichtig zouden zijn; deze zien wij anders alleen maar bij de band van Alexander optreden, omdat het weinige licht dat daar vandaan komt praktisch alleen door *uitwendige* weerkaatsingen op de druppels ontstaat. Bij een nadere beschouwing blijkt ook dit licht tangentiell gepolariseerd te zijn. Dit effect valt echter volkomen in het niet bij dat van de heldere, aangrenzende regenbogen.

Ook het overige deel van de hemel vertoont bij regen wel tangentiële polarisatie, en wel het sterkst op zo'n 80° van de zon, waar de *uitwendige* weerkaatsing op de druppels onder de Brewster hoek gebeurt. Deze polarisatie, die vergelijkbaar is met die van de wolken, komt echter niet zo markant over als die van de regenbogen. Dichter dan 80° bij de zon lichten de druppels hoofdzakelijk op ten gevolge van brekingen. De hemel is hier dan ook veel helderder dan het gebied tegenover de zon. Polarisatie is hier praktisch afwezig: voor zover dit nog optreedt is het zeer zwak, en radieel gericht, zoals men van brekingen mag verwachten (§ 79).

29 Spiegelbogen en abnormale regenbogen

Regenbogen kunnen soms afwijkende vormen vertonen. Zo kan men soms de *gespiegelde regenboog* (plaat 27) in een glad wateroppervlak zien, terwijl omgekeerd het spiegelbeeld van de zon in staat is een regenboog op te wekken aan de hemel. Deze laatste boog noemt men wel de *spiegelboog* (plaat 28).

Bij spiegeling van een regenboog verandert de polarisatie van zijn licht maar weinig: het polarisatievlak wordt niet gespiegeld bij zo'n scherende weerkaatsing (§ 87). Omdat het spiegelbeeld van de regenboog echter wel tegengesteld gekromd is, volgt de polarisatie ervan nu niet, zoals bij de regenboog zelf, de vorm van de boog. Van tangentiële polarisatie is dus geen sprake meer. Wel is het zo, dat men de regenboog en zijn spiegelbeeld met ongeveer dezelfde stand van het filter kan uitdoven (fig. 25).

Men kan natuurlijk ook een spiegelbeeld van de regenboog waarnemen door een gepolijste metalen plaat of een gewone spiegel op de grond te leggen. Dan is de polarisatierichting wel ongeveer rakend aan de boog, omdat deze stoffen niet alleen de boog, maar ook het polarisatievlak spiegelen (plaat 51 op blz. 76 en § 91). Onder deze kunstmatige omstandigheden wordt vooral door de metalen plaat bovendien een gedeelte van het lineaire regenbooglicht omgezet in circulair licht: het rechter deel van de gespiegelde

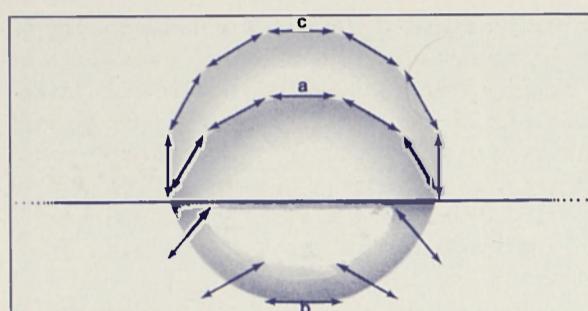


fig. 25 a = regenboog,
b = gespiegeld regenboog,
c = spiegelboog.
Pijltjes geven de polarisatierichting aan.

regenboog is dan linksdraaiend en het linker deel rechtsdraaiend (§ 90 en 91). Gebruikt men als spiegeldend vlak een glasplaat of ruit, dan is de polarisatie analoog aan die men ziet bij spiegeling op water.

Spiegelbogen zijn nogal zeldzaam, meestal ziet men slechts delen ervan. Van deze boog kan men verwachten dat de polarisatie wel tangentieel is gericht, zij het niet ten opzichte van de zon maar ten opzichte van zijn spiegelbeeld. Dus is de polarisatie rakend ten opzichte van de boog (zie fig. 25). Afwijkingen hiervan kunnen ontstaan omdat het licht van de weerspiegelde zon zelf sterk horizontaal gepolariseerd kan zijn, maar in het algemeen zal dit niet merkbaar zijn. De *gespiegeld dauwboog* en de *spiegeldauwboog* die men wel op slootjes kan zien, gedragen zich op dezelfde wijze als de gespiegeld regenboog en de spiegelboog, zodat men door te kijken of de polarisatie rakend is aan de boog, kan beslissen met welke boog men te doen heeft.

Onder uiterst zeldzame omstandigheden verschijnen er wel eens extra bogen aan de hemel op afwijkende plaatsen. Meestal gebeurt dit in de buurt van wateroppervlakken. Sommige ervan zijn spiegelbogen, maar dan met de weerkaatsing op ruw water, doch voor andere bestaat er nog in 't geheel geen bevredigende verklaring. Heeft men het geluk zo'n spiegelboog of een andere abnormale regenboog te zien, fotografeer hem dan en bestudeer zijn polarisatie. Is de polarisatie in de lengterichting van de boog of wijkt hij er van af? Is de polarisatiegraad hoog, of is deze minder dan die van de regenboog zelf? Waarnemingen van de polarisatie van dit soort verschijnselen kunnen soms een sleutel verschaffen bij het verklaren van dergelijke merkwaardige en zeldzame bogen.

30 Mistbogen en wolkenbogen

Zoals geen twee bomen gelijk zijn, zo verschilt ook de ene regenboog van de andere. Het grootste contrast bestaat wel tussen een schitterend gekleurde regenboog, zoals wij die wel in een wegtrekkende bui te zien krijgen en de fletse witte mistboog, die gevormd wordt in hele kleine waterdruppeltjes.

Inderdaad verandert het uiterlijk van de regenboog als de waterdruppels kleiner worden, zoals wij gemakkelijk zelf kunnen constateren met een bloemenspuitje (plaat 29). De kleuren gaan elkaar overlappen en de boog wordt witachtig met ten hoogste aan de rand een flauwe verkleuring. Zijn straal wordt ook wat kleiner, en de overtuigende bogen staan op een grotere afstand van de boog. Nevenregenbogen worden moeilijker te zien. De allerkleinste druppeltjes, zoals die wel in wolken voorkomen, geven alleen nog maar een iets verhoogde helderheid van het wolkenlicht op zo'n 145° van de zon; de kleuringen zijn dan geheel verdwenen. Slechts een ervaren waarnemer kan zijn aanwezigheid constateren (plaat 30).



Plaat 22-23 Links: dauwboog op gras. Rechts: rode regenboog bij zonsondergang (§ 27).



Plaat 24-26 Polarisatie regenboog. Onder zonder filter; boven met filter voor de camera in twee standen (§ 27).



Plaat 27-28 Links: spiegeling van de regenboog op water. Rechts: tussen de bogen in verschijnt hier een deel van de spiegelboog (§ 29). (Foto rechts: K. Lenggenhager).



Plaat 29-30 Links: regenboog in bloemenspuitje. De kleinste druppels (vlak bij het sputje) geven een blekere boog. Rechts: de extra helderheid van de wolken in het midden is het gevolg van regenboogstrooing (§ 21, 30).

De tangentiële polarisatie van deze mist- of wolkenboog blijft echter aanwezig, zij het dat hij wat minder sterk is dan bij grote druppels. Door deze polarisatie verraadt de wolkenboog dan zijn aanwezigheid: met een polarisatiefilter zien wij dat het licht van waterwolken op ongeveer 145° van de zon abnormaal sterk gepolariseerd is, zeker vergeleken met dat van ijswolken! Dit effect kwam reeds in § 21 ter sprake. Op deze wijze kan toch iedereen de wolkenboog gemakkelijk waarnemen. Het is merkwaardig zich te realiseren dat regenbogen praktisch iedere dag te zien zijn, zij het slechts in de vorm van deze weinig opvallende wolkenboog. In *mist* blijft de vorm van de boog meestal beter herkenbaar, en vertoont vaak ook nog enige kleur aan zijn rand, zodat men de mistboog ook zonder deze truc gemakkelijk kan zien. Deze boog kan men ook wel waarnemen in de damp van een *doucheel*, als hierin een dun straaltje zon naar binnen schijnt. Men ziet de boog dan als een 'verdikking' van deze lichtstraal, ofwel als een grotere plaatselijke helderheid.

Samen met de tangentieel gepolariseerde mistboog treedt vaak de radieel gepolariseerde *glorie* op, die verschijnt rond de schaduw van de waarnemer als een kleurig aureool. Dit verschijnsel vertoont zich dus op 180° van de zon. Het gelijktijdig verschijnen van deze tegengesteld gepolariseerde verschijnselen geeft aanleiding tot interessante observaties (zie § 42).

31 Overtallige mistbogen

De polarisatie van mistbogen is geringer dan die van de regenboog, zodat men deze boog met een polarisatiefilter niet geheel kan uitdoven. Nu blijkt er iets merkwaardigs op te treden bij de mistboog: in radiële richting zijn de *overtallige* mistbogen niet alleen gedeeltelijk verzwakt, maar blijken zij ook *verschoven* te zijn ten opzichte van hun posities in tangentiële richting. Ze bevinden zich nu precies tussen de overtuigende bogen in de heldere (tangentiële) richting in. Dit wonderlijke effect wordt veroorzaakt door de extra fasesprong van 180° voor verticaal licht, die optreedt als de invalshoek de Brewster hoek passeert (zie § 87) en die ook verantwoordelijk is voor het spiegelen van het polarisatievlak bij weerkaatsing met een scheve inval. Overtallige bogen zijn het resultaat van interferenties van twee lichtstralen die een verschillende weg door de druppel doorlopen hebben, maar wel allebei éénmaal tegen de achterzijde van de druppel weerkaatst zijn (fig. 26). Gebeurt de ene weerkaatsing nu met een invalshoek kleiner, en de ander met een invalshoek groter dan de Brewster hoek, dan treedt er voor verticaal licht een extra faseverschil van 180° op, waardoor interferenties destructief worden die anders constra-

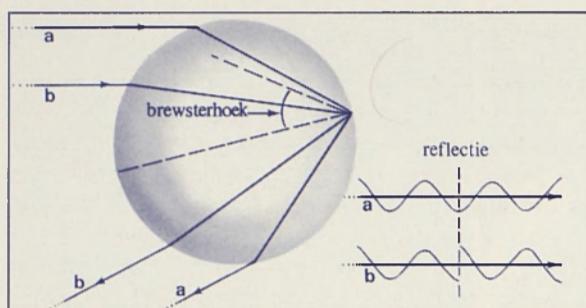


fig. 26 Vorming van overalige bogen door interferentie van lichtstraal (a) en (b). Voor verticaal licht ondergaat (b) een extra fasesprong die bij (a) en bij horizontaal licht niet optreedt. Hierdoor verschuift een overalige boog voor radieel licht.

tief zouden zijn (§ 87). Dit veroorzaakt een verschuiven van de overalige bogen. Bij de regenboog gebeurt de inwendige weerkaatsing zo dicht bij de Brewster hoek, dat deze verschuiving al optreedt als de druppeldiameter kleiner dan ongeveer 1 mm is. Maar pas voor veel kleinere druppels is de polarisatiegraad zover afgenomen dat men hoop mag hebben deze boog met een radieel gericht filter te kunnen waarnemen.

Gemakkelijk is deze waarneming zeker niet, ook al omdat mistbogen toch vrij zeldzaam zijn, en deze boog met een radieel filter moeilijk te zien is. Des te groter is de uitdaging dit effect in de vrije natuur eens waar te nemen.

32 Dertiende regenboog?

Lichtstralen die een regendruppel pas na drie, vier of meer inwendige kaatsingen verlaten, kunnen evengoed tot regenboogvorming aanleiding geven. Deze 'hogere regenbogen' verschijnen veelal aan een ander gedeelte van de hemel als de hoofd- of de nevenregenboog. Ze worden echter nooit buiten het laboratorium gezien, omdat hun licht te veel verzwakt is door al deze kaatsingen en ze bovendien volkomen overstraald worden door licht dat anderszins via de druppel de hemel verlicht. Hun bestaan kan men echter gemakkelijk aantonen door een glazen of een met water gevulde bol te bestuderen, die door de zon beschinen wordt: onder bepaalde hoeken ziet men dan kleurige puntjes aan de rand van zo'n bol verschijnen. Gemakkelijk kan men dan constateren, dat ook het licht van deze regenbogen tangentieel gepolariseerd is. In de natuur zien wij echter alleen de hoofdregenboog en de nevenregenboog, aangezien deze behoorlijk helder zijn en aan zo'n donker deel van de hemel verschijnen.

Niettemin is er gesuggereerd, dat ook de dertiende regenboog (dertien weerkaatsingen tegen de wand van de druppel!) onder gunstige omstandigheden in de natuur zichtbaar zou kunnen zijn, en wel met behulp van een polarisatiefilter. Deze boog verschijnt op zo'n 80° van de zon. Tijdens regen is de lucht hier donker en sterk, tangentieel gepolariseerd (§ 28). Nu kan deze polarisatie nog aanzienlijk sterker zijn dan die van de dertiende regenboog, die ongeveer 75% bedraagt en eveneens tangentieel gericht is. Met een *radieel* gericht filter zou dus het achtergrondlicht sterker gedooft worden dan deze regenboog, en theoretisch gesproken zou deze dan te voorschijn moeten komen. Het lijkt ons echter niet zo waarschijnlijk dat een dergelijke waarneming ook in de natuur gemakkelijk tot het gewenste resultaat zal leiden en deze boog anders dan onder laboratoriumomstandigheden bestudeerd kan worden. Ook hier geldt natuurlijk, dat men bij een zware regenlucht allicht kan proberen of men deze zwakke regenboog met een filter toch in de natuur kan zien, hoe onwaarschijnlijk dit ook op het eerste gezicht lijkt.

33 Halo's, verschijningsvorm (plaat 31-40)

Regenbogen, glories (§ 42) en dergelijke zijn optische verschijnselen die slechts kunnen optreden als er zich waterdruppels in de atmosfeer (of op de grond) bevinden. Bevriezen deze druppels tot sneeuw- of ijskristallen, dan kan er van al deze verschijnselen geen sprake meer zijn. Heldere ijskristalletjes zijn echter eveneens in staat zonlicht te breken en te weerkaatsen, en geven zo aanleiding tot allerlei verschillende soorten kringen, vlekken of bogen aan de hemel, waarvan er een aantal soms zeer fraaie regenboogachtige kleuren vertoont. Kringen van dit soort hebben altijd de zon (of maan) tot middelpunt, zoals de regenboog altijd het tegenpunt hiervan als middelpunt heeft. Optische verschijnselen ten gevolge van brekingen aan ijskristallen verschijnen meestal aan de kant van de hemel waar ook de zon staat. Ze dragen de verzamelnaam *halo's*. Zeldzaam zijn ze helemaal niet: gemiddeld is er op twee van de drie dagen wel ergens in Nederland een halo te zien. Niettemin zijn er betrekkelijk weinig mensen die er wel eens een waargenomen hebben, dit in tegenstelling tot de – toch veel zeldzamer – regenboog. Deze laatste verschijnt echter aan het donkere gedeelte van de hemel tegenover de zon, terwijl de meeste halovormen juist betrekkelijk dicht bij de zon te zien zijn. Daarom zijn ze vaak zo lichtsterk dat men er met het ongewapende oog niet makkelijk inkijkt. Met een flinke zonnebril zal men echter gemakkelijk kunnen constateren, dat deze fraaie verschijnselen vaak te zien zijn, en wel bijna altijd als er zich cirrusachtige bewolking nabij de zon bevindt.

Er bestaat een enorme verscheidenheid in soorten bij de halovormen, doordat ijskristallen het zonlicht op zo veel verschillende manieren kunnen breken, maar de belangrijkste (=meest voorkomende) halo's laten zich ruwweg in drie klassen onderverdeelen.

1. Lichtsterke, gekleurde verschijnselen op ongeveer 22° van de zon (of van de maan). Dit kan een ronde *kring* zijn, maar ook zeer heldere vlekken ter weerszijde hiervan (*de bijzonnen*) of gekromde bogen van wisselende vorm er boven of er onder. Het rood staat aan de kant van de zon en is meestal zeer opvallend. Oranje en geel zijn ook nog duidelijk te zien, maar de andere kleuren zijn fletser. Halo's van deze klasse behoren tot de meest voorkomende.

2. Zwakkere, maar kleurrijker verschijnselen van dezelfde aard en met dezelfde kleurvolgorde op ongeveer 46° van de zon. Hun kleurrijkdom overtreft vaak die van de regenbogen.

3. Ongekleurde (witte) vlekken en banden op verschillende plaatsen aan de hemel. Bij maanlicht lijken bijna alle halo's kleurloos, aangezien het oog dan nauwelijks kleurvoelig is. Alleen de heldere bijzon ('s nachts de *bijmaan* genoemd) vertoont dan nog kleuren (plaat 33-34).

In fig. 27 is een schets gemaakt van de belangrijkste haloverschijnselen. De halo's behoren zeker tot de rijkst geschakeerde verschijnselen om waar te nemen, niet alleen om hun fraaie kleuren en hun grote variatie in soorten, maar ook door de afwisseling waarmee ze in snel tempo kunnen verschijnen en weer verdwijnen. In fig. 27 zijn ook enkele halo's onder de horizon getekend; deze zijn in het algemeen slechts vanuit vliegtuigen of vanaf hoge bergen zichtbaar. De meeste voorkomende vormen zijn in volgorde de 'kleine kring' op 22° van de zon (c), de *bijzonnen* op 22° ter weerszijde van de zon (a), de *raakbogen* aan de kleine kring (d en e), de *circumzenitale boog* op 46° boven de zon (b) en de *zuil* (i). De 'grote kring' op 46° (f), de *parhelische ring* (g) en de *bijtegenzonnen* (h) zijn aanmerkelijk zeldzamer.

Wat betreft de vorm verdient in dit lijstje de benedenraakboog aan de kleine kring van 22° (fig. 27, e) hier een aparte vermelding, omdat deze bij zonshoogten tussen de 10 en 13 graden plotseling een hoogstmerkwaardig, lusvormig gedaante aanneemt. Het kruispunt van deze lus is wit en bevindt zich altijd precies op de plaats waar men zich de onderzon ($\S\ 39$) moet denken. Bij deze zonshoogten verandert de boog zo snel van uiterlijk dat men een goede kans heeft er door overvalen te worden: hij wijzigt zijn vorm letterlijk van minuut tot minuut. Omdat de boog zich dan echter al geheel onder de horizon bevindt, zal men dit nooit vanaf de grond, maar wel vanuit een vliegtuig of vanaf een hoge berg te zien kunnen krijgen. De veel zeldzamere benedenraakboog aan de grote kring moet overigens bij zonshoogten tussen de 22 en 28 graden precies hetzelfde gedrag vertonen en dus lusvormig worden, met een kruispunt op de plaats van de onderzon. Het is mij niet bekend of dit wel eens is waargenomen.

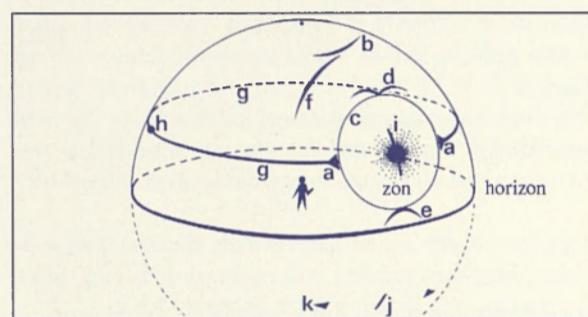


fig. 27 Schets van de belangrijkste halo's: bijzon (a), circumzenitale boog (b), kleine kring van 22° (c), boven(d) en benedenraakboog (e), deel grote kring van 46° (f), parhelische ring (g), bijtegenzon van 60° (h) en de zuil (i). De onderzon (j) en benedenbijzon (k) zijn halo's die zich onder de horizon bevinden. Halo (g), (h), (i) en (j) zijn ongekleurd.

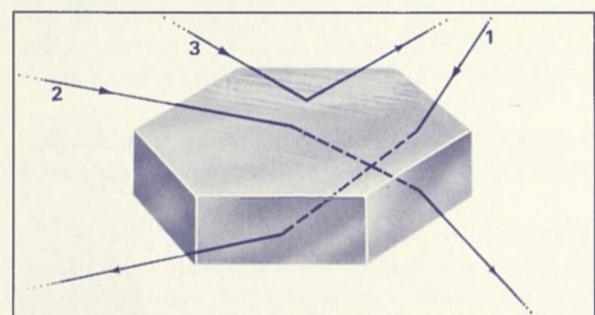
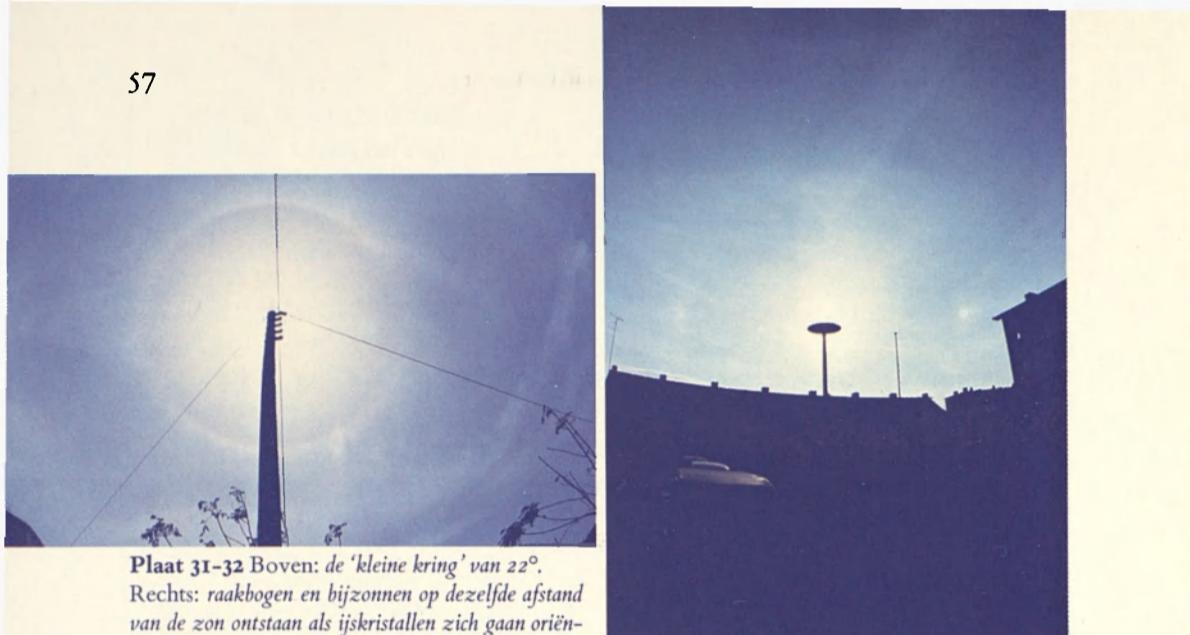


fig. 28 Door een ijskristal zijn vele lichtwegen mogelijk; iedere stralengang geeft aanleiding tot de vorming van een andere halo.

34 Halo's, ontstaanswijze

De vele soorten halo's die kunnen optreden maken het nuttig kort op hun ontstaanswijze in te gaan alvorens hun polarisatie-effecten te bespreken.

Halo's ontstaan alle door brekingen en reflecties aan ijskristallen die in de atmosfeer zweven. Deze kristallen zijn i.h.a. zeshoekjes met afgeplatte uiteinden. Juist zoals bij een glazen prisma of een geslepen diamant zijn er in een dergelijk kristal een zeer groot aantal combinaties van brekingen en reflecties mogelijk, zodat er een groot aantal lichtwegen door het kristal mogelijk zijn. In fig. 28 zijn een aantal van deze lichtwegen



Plaat 31-32 Boven: de 'kleine kring' van 22° . Rechts: raakbogen en bijzonen op dezelfde afstand van de zon ontstaan als ijskristallen zich gaan oriënteren en dus niet meer willekeurig door de lucht dwarrelen (§ 34). Groothoekopnamen.



Plaat 33-34 Links: bijzon op 22° van de zon. Rechts: bijmaan, hetzelfde verschijnsel bij de maan (§ 33). Het heldere puntje bij de bijmaan is de planeet Jupiter.

Plaat 35 Onder de bijzon vormt zich hier een benedenbijzon (§ 39); deze bevindt zich altijd onder de horizon. Hij is vaak vanuit vliegtuigen te zien.



getekend. Welke halo er nu aan de hemel ontstaat is afhankelijk van de weg die het licht door het kristal heeft afgelegd. Bovendien is van belang welke oriëntatie het kristal in de atmosfeer heeft aangenomen; de halovorm die verschijnt is verschillend voor iedere andere lichtweg en voor iedere andere oriëntatie. Bij een willekeurige oriëntatie, als de ijskristallen dus als boombladeren door de atmosfeer dwarrelen, verschijnen de ronde kringen rond de zon; als alle kristallen op dezelfde wijze gericht zijn ontstaan er in plaats van kringen, de vlekken of bogen op ongeveer dezelfde afstand van de zon als de kringen (plaat 31-32). De met één genummerde lichtweg in fig. 28 is verantwoordelijk voor de vorming van de haloverschijnselen in de eerste groep, dus op 22° van de zon.

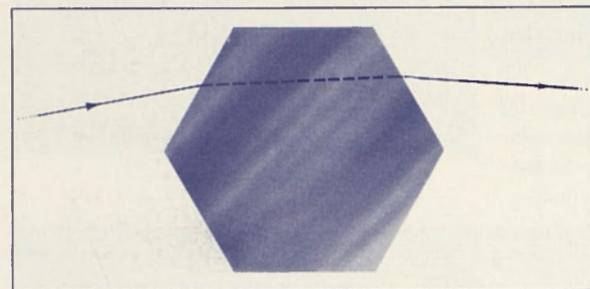


fig. 29 Stralengang door ijskristallen die verantwoordelijk is voor het ontstaan van de halovormen op 22° van de zon (straal 1 in fig. 28).

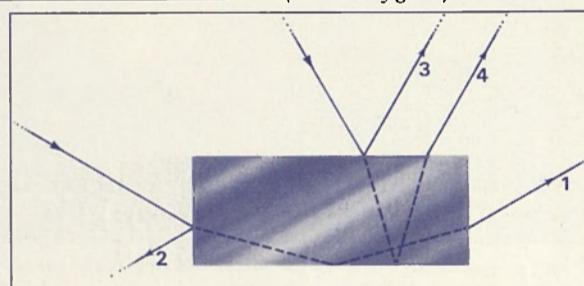


fig. 30 In- en uitwendige reflecties geven ook halovorming. Reflectie 1 is totaal; 2, 3 en 4 niet.

Het hangt hierbij dus slechts van de oriëntatie van de kristallen af welk van deze verschijnselen nu precies verschijnt. Dezelfde lichtweg is afgebeeld in fig. 29; het licht wordt twee keer gebroken door vlakken die een hoek van 60° met elkaar maken, en is niet weerkaatst. Halo's die op deze wijze ontstaan zijn, behoren tot de meest voorkomende.

Wordt het licht nu gebroken door vlakken die een hoek van 90° met elkaar maken, zoals bij lichtweg 2 van fig. 28 het geval is, dan verschijnen de (zeldzamer) halovormen op 46° van de zon. Reflecties tegen de wanden van ijskristallen veroorzaken de derde klasse halo's (fig. 30). Deze reflecties kunnen zowel uitwendig als inwendig geschieden, en in dit laatste geval kan hij ook totaal zijn. Is dit het geval, dan is de intensiteit van het gekaatsde licht vele malen groter dan bij een niet-totale reflectie.

De kleuren, die een groot aantal halo's vertonen zijn ook hier het gevolg van kleurschifting van zonlicht. Net als bij de regenboog is zo'n kleurige verschijning eigenlijk niet anders dan een heldere *grens* van een bepaald gebied aan de hemel, dat door een specifieke combinatie van brekingen en reflecties aan ijskristallen oplicht. Ook hier wordt de uiterste grens gevormd door rood licht. Daar dit bij vrijwel alle gekleurde halo's aan de kant van de zon staat, is de lucht binnen de halo donkerder dan daarbuiten.

35 Polarisatieeffecten bij halo's: globaal overzicht

Het onderzoek hiernaar is een bijna braakliggend terrein. Toch blijken deze verschijnselen fraaie en onverwachte polarisatieeffecten te kunnen vertonen! Zo gevarieerd als de halovormen zelf zijn, zo verschillend kan ook de polarisatie van het halolicht zijn. Omdat er echter geen principieel verschil is in de brekingen en reflecties die tot vorming van één bepaalde klasse halo's leiden, is er ook geen duidelijk verschil in polarisatie tussen zulke halo's. Zo vertonen de kring, bijzon of raakboog op 22° van de zon alle essentieel dezelfde polarisatie. Tussen halo's van verschillende klassen (bijv. op 22° en 46° van de zon) zijn deze verschillen wel sterk aanwezig, omdat deze door geheel andere lichtwegen door het ijskristal tot stand komen. Wil men begrijpen waar de polarisatie van een bepaalde halo vandaan komt, dan zal men dus zeer precies moeten nagaan welke brekingen en weerraatsingen tot hun vorming leiden.

Bij halo's waar slechts brekingen, en geen reflecties een rol spelen ontstaat *radieel* gepolariseerd licht. Deze polarisatie is *sterker* naarmate de breking sterker is, m.a.w. naarmate het verschijnsel verder van de zon staat. De kringen op 22° en 46° komen op zo'n manier tot stand; de eerste is minder gepolariseerd dan de laatste. Slechts bij de 46° halo is de polarisatie zo sterk dat hij gemakkelijk waarneembaar is. Halovormen waarbij reflectie een rol speelt kunnen daarentegen sterker gepolariseerd zijn; de richting is dan *tangentiell* ten opzichte van de zon. Deze sterke polarisatie treedt echter alleen op als de reflectie niet totaal is, of als tenminste de hoeveelheid licht die via totale reflectie tot ons komt klein is ten opzichte van het niet totaal gereflecteerde deel. Het gepolariseerd licht van deze halo's valt overigens niet altijd onmiddellijk op, omdat de richting ervan dezelfde is als die van de gepolariseerde blauwe hemel of wolken waartegen ze zich aftekenen, en ook hier de maximale polarisatie optreedt op zo'n 90° van de zon. Men ziet dus door een filter weinig contrastverandering optreden tussen de halo en zijn achtergrond: ze worden beide op ongeveer dezelfde wijze afgezwakt.

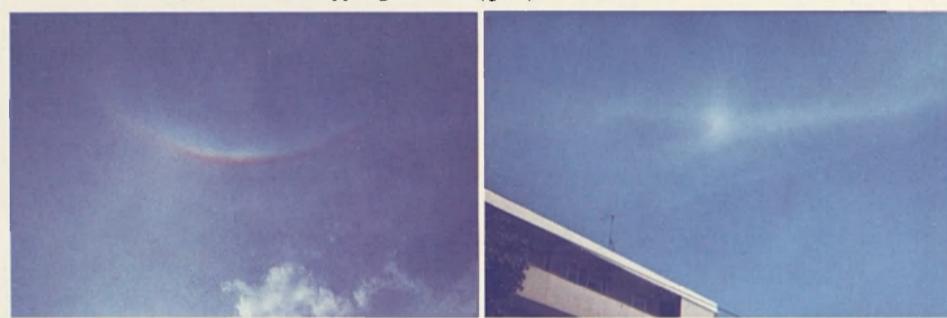
Van belang is verder, dat ijskristallen dubbelbrekend zijn. Dit leidt tot merkwaardige polarisatieeffecten voor sommige halo's, zoals die op 22° en 46° van de zon. Dit is weinig bekend. Ijskristallen zijn éénassige, positieve hexagonale kristallen; de optische as staat loodrecht op de uiteinden (zie fig. 31 op blz. 61). Lichtstralen die loodrecht op deze as bewegen zijn het sterkst aan dubbelbreking onderhevig; bij de halo's is dit vooral de bovengenoemde klasse op 22° van de zon.

Uit het bovenstaande moge blijken, dat het aantal polarisatieeffecten bij halo's groot is, en specifiek afhangt van de weg die het licht door een ijskristal doorklopt heeft. Van sommige (zeldzame) halovormen is de precieze ontstaanswijze nog onbekend. Hier kan het waarnemen van hun polarisatie een steun betekenen voor het vinden van de juiste verklaring, omdat dit extra gegeven vaak een aantal mogelijke ontstaanswijzen kan uitsluiten. *Circulaire* polarisatie zal waarschijnlijk bijna nooit in waarneembare mate bij halovormen optreden.

Tenslotte nog het volgende. De polarisatierichting bij bijv. raakbogen volgt zo ruwweg de vorm van deze boog, en is dus niet op alle plaatsen radieel ten opzichte van de zon, zoals de bijbehorende kring. Ook bijzonnen e.d. kunnen een iets afwijkende richting van het polarisatievlak vertonen. In het algemeen zijn dit soort afwijkingen, die het gevolg zijn van de oriëntatie van de kristallen, slechts zo gering, dat wij meestal zullen volstaan met te refereren naar de polarisatierichting van de kringen (dus radieel of tangentiell).



Plaat 36-37 Links: bijzon, opgewekt met een kwartskristal. Het onderste deel van de foto is door een filter opgenomen; hier is het rechterdeel van de bijzon uitgedoofd. Met het filter in de andere stand verdwijnt het linkerdeel. Ook bij natuurlijke bijzonen (rechts) treedt dit op, maar hier staan de gepolariseerde componenten zeven keer dichter bij elkaar en overlappen grotendeels (§ 36).



Plaat 38-39 Links: de circumzenitale boog op 46° boven de zon. Deze verschijnt vaak tegelijk met de bijzonen en vertoont merkwaardige polarisatieeffecten (§ 37). Foto G. M. Jonker-de Wit. Rechts: de parhelse ring met een bijtegenzon; deze behoren tot de reflectiehalo's (§ 39). Foto P. P. Hattinga Verschure.



Plaat 40 De onderzon, een sterk gepolariseerde reflectiehalo. Deze is vaak vanuit vliegtuigen te zien (§ 39). (Foto G. J. Heinen, KLM)

36 Polarisatie van bijzonen, kringen en bogen op 22° van de zon

De groep halo's op 22° van de zon (de 'kleine kring', bijzonen, raakbogen (plaat 31-34 en fig. 27 c, a, d en e)) ontstaan alle door een zwakke breking, en op grond hiervan verwachten wij dan ook nauwelijks polarisatie. De berekening leert dat de polarisatiegraad slechts 4% moet zijn; deze polarisatie is radieel gericht. Bij het bestuderen van deze verschijnselen door een filter zien wij echter toch een, zeer merkwaardig, effect optreden: het blijkt dat voor radiële trillingen deze verschijnselen ongeveer 0.11° dichter bij de zon staan dan voor tangentiële trillingen! Dit is bij al deze verschijnselen te zien, maar het duidelijkst voor heldere *bijzonen* (plaat 37), omdat deze over het algemeen een scherpe begrenzing hebben aan de kant van de zon. Het is hier dus *niet zo*, dat men het verschijnsel uit kan doven met een polarisatiefilter, zoals dat bijv. bij regenbogen het geval is, maar dat het hele verschijnsel een *verschuiving* vertoont als men het filter voor het blote oog ronddraait. Deze verschuiving van 0.11° lijkt wel niet veel, maar is toch duidelijk waarneembaar: het is ongeveer een kwart van de schijnbare maandiameter en de cirrusbewolking fungeert meestal als een goede referentie om de verschuiving te meten.

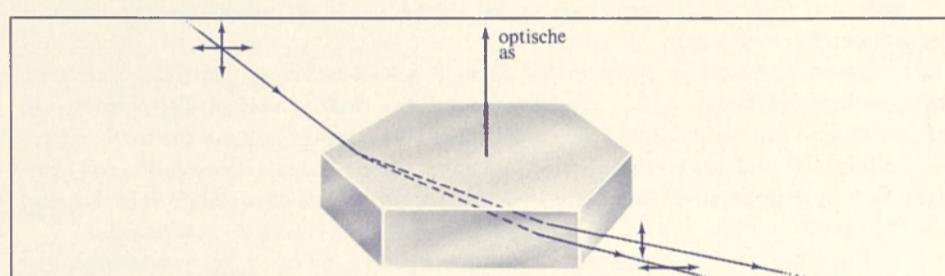


fig. 31 Bij doorgang door een ijskristal wordt natuurlijk licht ten gevolge van dubbelbreking gesplitst in twee gepolariseerde lichtstralen die ieder hun eigen halo opwekken.

De oorzaak van dit wonderlijke verschijnsel is gelegen in de dubbelbrekende eigenschappen van de ijskristallen waarin halo's gevormd worden (§ 83). Het ongepolariseerde zonlicht wordt dus bij zijn doorgang door het kristal gesplitst in twee, loodrecht op elkaar gepolariseerde bundels, die elk zijn eigen halo kan genereren (fig. 31). Deze gepolariseerde halo's zijn slechts 0.11° ten opzichte van elkaar verschoven en vallen dus grotendeels over elkaar (de afstand tussen rood en geel in een 22° halo is ongeveer 0.5°), maar met een polarisatiefilter zien wij deze halo's afzonderlijk. De verschuiving die men met een filter kan waarnemen is voor alle kleuren gelijk. De zwakst gebroken bundel trilt loodrecht op de optische as van het kristal, zodat de 'radiële' halo het dichtst bij de zon staat. Bij de bijzon is de polarisatie van de dichtst bij de zon staande component eigenlijk *horizontaal* in plaats van radieel, omdat hier de ijskristallen alle zodanig georiënteerd zijn dat hun optische as verticaal ten opzichte van de horizon staat. De uiterste, rode begrenzing van de bijzon is dus 100% gepolariseerd in horizontale richting; elders is horizontaal licht vermengd met verticaal licht van een iets andere kleur. Met een filter kan men ook deze menging opheffen, waardoor de kleuren van de bijzon zuiverder worden. In fig. 32 is de polarisatie van de bijzon schematisch weergegeven.

De verschuiving van bijzonen, zoals hierboven beschreven, kan men gemakkelijk in de huiskamer op aanschouwelijke wijze nabootsen met een kwartskristalletje (plaat 36). Door hier zonlicht door te laten vallen kan men een 'bijzon' creëren op een schermpje.

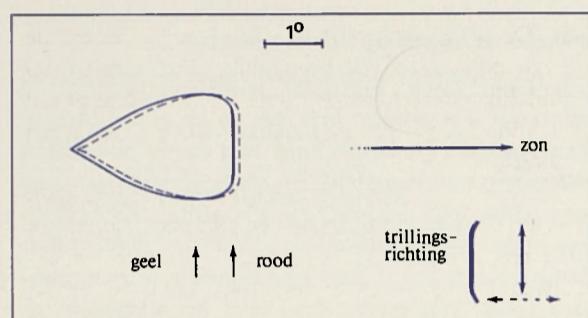


fig. 32 De bijzon voor twee polarisatierichtingen. Zonder filter zien wij deze door elkaar heen, met filter kan men na keuze de ene of de andere zien.

Aangezien kwarts zo'n zeven maal sterkere dubbelbreking vertoont dan ijs, zijn de 'bijzonen' voor de twee polarisatierichtingen sterker verschoven dan in de natuur: het rood van het verticaal gepolariseerde deel valt ongeveer samen met het blauw van het horizontale deel. Met een filtertje zal men opmerken dat sommige kleuren van de bijzon veel dieper zijn als men de andere component uitgedoofd heeft, omdat er geen menging van kleuren meer plaatsvindt. Omdat bij draaiing van het filter de verschuiving nu zo'n 0.7° bedraagt, leent dit proefje zich er bij uitstek voor dit merkwaardige effect te demonstreren (zie ook § 51).

Bij een hoge zonnestand ($\pm 45^\circ$) kan de bijzon als geheel wel enige polarisatie vertonen, omdat de brekingen dan sterker zijn. Tracht dit eens waar te nemen. De richting van deze polarisatie kan enigszins afwijken van radieel, ten gevolge van interne totale reflecties die het licht ondergaat. Helaas zijn bijzonen bij een hoge zonnestand nogal zeldzaam, en is deze polarisatie lang niet zo spectaculair als de bovengenoemde verschuiving, ook al omdat de polarisatiegraad in het gunstigste geval niet boven de 20% uitkomt.

Er is wel gesuggereerd, dat sommige bijzonen, speciaal bij een hoge zonnestand, niet door direct zonlicht worden gevormd, maar door licht van de onderzon. Het zouden dan *benedenbijzonen* van de *onderzon* zijn (§ 39). In dat geval zouden de bijzonen een sterke, horizontale polarisatie moeten vertonen, gelijk aan die van de onderzon. Het is echter twijfelachtig of bijzonen vaak op een dergelijke wijze ontstaan. Waarnemingen met een polaroid kunnen het bestaan ervan aantonen; het is een van de weinige mechanismen die tot een aanzienlijke polarisatie van de bijzon als geheel zouden kunnen leiden.

37 Halo's op 46° van de zon

Hieronder vallen de grote kring van 46° en de circumzenitale boog, recht boven de zon. Deze halo's zijn minder helder dan de halo's op 22° van de zon, maar overtreffen ze in kleurrijkdom. Het dankbaarste object is de, vaak zeer fraaie, *circumzenitale boog* (plaat 38), die vaak tegelijk met de bijzonen verschijnt als de zon niet te hoog staat ($\pm 15-25^\circ$), (zie fig. 33). De 46° halo's ontstaan door een sterkere breking dan de 22° halo's, en hun

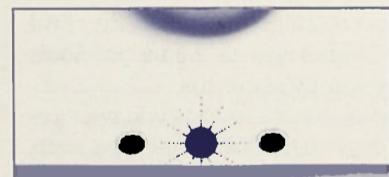


fig. 33 Typische halolucht bij laagstaande zon. Als er links of rechts een bijzon verschijnt bestaat er een goede kans dat hoog boven de zon ook de circumzenitale boog te zien is.

radiële polarisatie is duidelijk te zien. De polarisatiegraad is hier 15-20%. Omdat de blauwe lucht en de wolken op 46° van de zon ook al behoorlijk, maar tangentieel gepolariseerd zijn, zien wij een zeer duidelijke *contrasttoename* tussen halo en achtergrond als wij hem met een filter in radiële richting bekijken; in de andere richting treedt een flinke uitdoving ten opzichte van de achtergrond op.

Behalve het bovenstaande zijn er ook bij deze halo's dubbelbrekingseffecten te zien zoals wij die in de vorige paragraaf beschreven. Ook bijv. de circumzenitale boog verschuift dus als men hem bekijkt door een filter en dat rond draait. De ervaring leert echter, dat dit meestal niet zo gemakkelijk te zien is als bij bijzonen en dergelijke. Dit komt omdat 46° halovormen doorgaans niet zo lichtsterk zijn, en bovendien de polarisatie van de halo als geheel en van zijn achtergrond hinderlijk kan zijn. Bij zeer heldere halo's, zoals de circumzenitale boog soms kan zijn, manifesteert het effect zich echter zeer duidelijk! De verschuiving die optreedt is ongeveer twee keer zo groot als die van de bijzon, maar omdat de kleurenband nu drie keer breder is, is het effect relatief gesproken toch wat minder sterk dan bij de bijzon. Interessant is, dat nu de *tangentiële* halo het dichtst bij de zon staat, dus juist omgekeerd als bij de 22° halofamilie. Met een tangentieel gericht filter ziet men dus twee dingen tegelijk optreden: de halo is flink afgezwakt en staat boven-dien het dichtst bij de zon.

38 Kringen en raakbogen met afwijkende zonsafstand

Dit zijn zeldzame haloverschijnselen die op een andere afstand van 22° of 46° van de zon verschijnen. Zij ontstaan door brekingen aan ijskristallen met een afwijkende vorm. De polarisatie van deze verschijnselen zal in het algemeen zwak zijn, omdat hun straal meestal klein is. Dubbelbrekingseffecten kan men bij een aantal van deze halo's echter wel verwachten. Als men zo een halovorm te zien krijgt, schat dan zijn straal en tracht de verschuiving op te meten die men met een filter ziet. In welke richting is de rode binnenkant gepolariseerd? Vaak zal dit laatste gegeven, samen met een schatting van de straal, al voldoende zijn om het verschijnsel te interpreteren, beter zelfs dan alleen maar een zo precies mogelijk uitgevoerde meting van de straal van de halo.

39 Reflectiehalo's

De zilverwitte *onderzon* (fig. 27, j en plaat 40) is veelvuldig vanuit vliegtuigen (plaat 8) en zelfs ruimteschepen (plaat 8, op blz. 26) te zien; van deze hoge standplaatsen is het waarschijnlijk de meest voorkomende halovorm. Het is een vaak langwerpige vlek die recht onder de zon verschijnt, op de plaats waar men de spiegeling van de zon op het aardoppervlak zou verwachten. Inderdaad is het een spiegelbeeld van de zon; het weerkaatsend vlak is echter niet een waterplas, maar bestaat uit de horizontale vlakken van vele georiënteerde ijskristallen via lichtwegen als in figuur 30. Het verschijnsel bevindt zich dus altijd onder de horizon en tekent zich vaak af tegen de wolken onder het vliegtuig. De onderzon vertoont meestal een sterke horizontale polarisatie, die enigszins afhangt van de zonshoogte. Het kan echter ook gebeuren dat er zóveel totaal gereflekteerd licht bijdraagt tot zijn vorming, dat polarisatie praktisch afwezig is. In dit geval wordt de onderzon dus hoofdzakelijk gevormd door lichtweg 1 in figuur 30. Soms verschijnt er rond de onderzon een gekleurde *kleine kring* van 22° ; deze moet dan eenzelfde horizontale polarisatie vertonen. Links en rechts van de onderzon zien wij vaak gekleurde bijzonen, de *benedenbijzonen* (fig. 27, k en plaat 35). Deze verschijnen dus recht onder de gewone bijzonen. Als het bijzonen van de onderzon zijn, of een weerkaat-

sing van de gewone bijzonen op de vlakken van ijskristallen, dan moet hun polarisatie horizontaal zijn en even sterk als het onderzonlicht. Ze kunnen echter ook (en waarschijnlijk vaker) ontstaan door totale reflecties in het vormende ijskristal zelf; in dit geval zijn ze ongepolariseerd en kunnen ze trouwens helderder zijn dan de onderzon zelf. Wel kunnen ze de verschuiving van 0.11° vertonen die gewone bijzonen ook te zien geven (§ 36). Boven de horizon, op dezelfde hoogte als de zon verschijnen soms de melkwitte *parhelische ring* en *bijtegenzonen van 60°* (fig. 27, g en h en plaat 39). De parhelische ring heeft als middelpunt het zenit en gaat door de zon heen; de bijtegenzonen bevinden zich als een verdikking in deze ring op 120° van de zon. Beide verschijnselen vertonen een tangentiële polarisatie, maar de sterkte ervan is doorgaans geringer dan die van de wolken waartegen ze zich aftekenen. Bij een ontstaan door uitwendige weerkaatsingen tegen de zijvlakken van georiënteerde ijskristallen zoals lichtweg 2 in figuur 30 zou men een hogere polarisatiegraad verwachten, maar blijkbaar speelt bij de vorming totale reflectie vaak een belangrijker rol. Is dat altijd het geval? Volgens sommige verklaringen hoeft dit niet, en zou de polarisatie op 90° van de zon dan zeer aanzienlijk kunnen zijn. In ieder geval is de polarisatie niet erg spectaculair, ook al omdat de richting ervan gelijk is aan die van de blauwe lucht en de wolken. Door een filter zien wij dus nauwelijks contrastveranderingen optreden. De witte *zuil* (fig. 27, i) ontstaat door weerkaatsingen tegen min of meer georiënteerde ijskristallen. Toch is zijn licht maar weinig gepolariseerd, behalve misschien op grotere afstand van de zon. Hier zal de polarisatie, net als bij de onderzon, horizontaal moeten zijn. De zuil verschijnt het meest bij een zeer laagstaande zon, als een lange, verticale band die dwars door de zon heenloopt. Als de zon dan roodgekleurd is, vertoont de zuil natuurlijk dezelfde tint.

40 Halo's op beslagen ruiten

Minnaert vertelt, dat als men zeer koude ruiten beslaat door er bijvoorbeeld tegen te ademen, hierop ijskristallen gevormd worden die tot de vorming van halo's aanleiding kunnen geven. Deze kan men waarnemen rond een lichtbron, die men door de ruit bekijkt. In dit geval zien wij dus niet een krans (§ 43), zoals men die meestal bij beslagen ruiten kan zien, maar een halo met een straal van ongeveer 8° . Deze halo schijnt *dubbel* te zijn, en het is wel gesuggereerd dat dit door dubbeldeling komt. In dat geval zouden deze componenten gepolariseerd moeten zijn, op dezelfde wijze waarop dit bij bijzonen het geval is. Met een polarisatiefilter is het dus mogelijk uit te maken of deze verklaring inderdaad de juiste is; erg waarschijnlijk lijkt dit overigens niet.

41 Kunstmatige halo's

Door een verzadigde zoutoplossing te laten kristalliseren (bijv. door afkoeling of door het toevoegen van alcohol) ontstaan in de oplossing zoutkristallen die halo's vertonen, meestal met een straal van ongeveer 10° . Hiertoe doet men de oplossing in een plat flesje, houdt het vlak bij het oog en kijkt men naar de zon of een andere lichtbron. Zeer goed lukt de proef met aluin; deze halo's zijn echter niet gepolariseerd. Als men op deze wijze een kunstmatige halo in NaNO_3 maakt, is deze daarentegen zeer sterk, radieel gepolariseerd. Dit komt omdat deze stof dubbeldeling is, maar deze dubbeldeling is niet minder dan 175 keer sterker dan die van ijs. De splitsing van licht in gepolariseerde bundels is daarom zó groot, dat radiële en tangentiële halo's volkomen gescheiden worden, en zich dus op een grote afstand van elkaar bevinden. In een oplossing verdwijnen de tangentiële halo's zelfs helemaal, omdat de brekingsindex voor dit licht praktisch gelijk is aan die van de oplossing waarin de kristallen zich bevinden.



Plaat 41 Heldere glorie, gezien vanuit een vliegtuig. Dit verschijnsel vertoont een levendige polarisatie. (Foto G. J. Heinen, KLM)

42 De glorie (plaat 41)

Dit is misschien wel het merkwaardigste verschijnsel uit de atmosferische optica. Het bestaat uit een gekleurd aureool, dat zich rond de schaduw van het hoofd van de waarnemer vormt. Een argeloos waarnemer zal daarom wellicht kunnen menen, dat dit aureool, dat hij nooit bij andermans schaduw ziet verschijnen, een teken is dat hij inderdaad boven andere mensen verheven is. Enigszins tegen deze verklaring pleit echter helaas het feit dat anderen even goed zo'n aureool rond hun eigen hoofd zien.

De glorie treedt slechts op als de schaduw op kleine druppeltjes valt, zoals wolken- of mistdeeltjes. De glorie is dus geen halo. Om hem te zien moet men zich boven de mist of wolken bevinden. Dit is een vrij uitzonderlijke situatie, zodat vroegere waarnemingen van dit verschijnsel vrij zeldzaam zijn. Tegenwoordig is de kans een volledige glorie te zien groter, doordat veel mensen vliegtochten ondernemen en zich tijdens de vlucht boven de wolken bevinden. Delen van de glorie kan men echter ook wel onder aardse omstandigheden zien, mits men weet waar te kijken, en men de juiste situatie weet te scheppen.

De afmetingen van de glorie (enkele graden in diameter) hangt slechts af van de grootte van de druppeltjes waarin hij gevormd wordt, en niet van de afstand tot de wolk. Hoe kleiner de druppels, des te groter is de glorie. Anderzijds hangt de grootte van de schaduw natuurlijk wel af van de afstand tot de wolk: als men zich van de wolk verwijdt, wordt de schaduw kleiner maar blijft de glorie dus even groot. Het centrum van de glorie bevindt zich juist daar waar men de schaduw van de ogen moet denken, dus precies tegenover de zon. Van deze eigenschap maakten piloten in vroeger tijd wel gebruik bij het navigeren: in plaats van de hoogte van de zon te meten 'schoot men een glorietje': zijn diepte onder de horizon correspondeert exact met de gezochte zons-hoogte. De geringere helderheid van de glorie maakte dit tot een gemakkelijker meting. Héve precies de glorie wel tegenover de zon staat blijkt als men door een vliegtuig naar voren wandelt: de glorie gaat dan mee langs de schaduw van het vliegtuig. Natuurlijk ziet iedereen aan boord zijn eigen glorie.

Bij nauwkeuriger beschouwing blijkt de glorie er als volgt uit te zien: een helder gebied direct rond de schaduw, en hierom heen gekleurde ringen met blauw binnen en het rood buiten. Bij de helderste, binnenveste ring is het rood het duidelijkst. De kleuren kunnen zich, zij het steeds lichtzwakker, herhalen, tot wel vijf keer toe. Op aarde is de glorie te zien op laaghangende nevel; het beste lukt dit als de achtergrond donker is (bijvoorbeeld boven een asfaltweg). Stukken glorie kan men ook wel zien in de damp boven een theekopje, in de 'wolk' die men tijdens een koude dag uitademt of in de damp in een doucheecel. In dit laatste geval zien wij hem het beste als er een dun straaltje zonlicht naar

binnen schijnt. Vanaf bergen of hoge torens die boven een mistlaag uitsteken kan men dit verschijnsel ook vaak zien. Meestal ziet men tegelijk met de glorie een *mistboog* (§ 30).

De polarisatie van de glorie is wel zeer markant. De gekleurde ringen zijn *radieel* gepolariseerd, dus tegengesteld aan de polarisatie van de mistboog. In een douchecel kan men deze tegenstelling al fraai constateren. Vlak bij zijn centrum, in het witte gebied, is de glorie daarentegen weer *tangentiell* gepolariseerd; het middelpunt zelf vertoont geen polarisatie. Deze wonderlijke tegenstelling ziet men het beste als men een heldere glorie in zijn geheel ziet. Met een filter dat bijvoorbeeld verticaal gericht is, worden dan de boven- en onderzijden van de gekleurde ringen helderder en schijnen dikker, terwijl er in het witte gebied vlak bij het centrum, eveneens aan de boven- en onderzijde, donkere, blauwachtige driehoekige gebiedjes verschijnen die met hun punt naar het middelpunt van de glorie wijzen (fig. 34). Bij rotatie van het filter draait deze structuur natuurlijk mee. Vaak zijn deze driehoekige gebiedjes van tangentiële polarisatie nog opvallender te zien dan de radiële polarisatie van de ringen er omheen. In een douchecel kan men overigens gemakkelijk vaststellen dat de sterkte van de polarisatieverschijnselen van geval tot geval kan verschillen, en dat er klaarblijkelijk een verband bestaat met de afmetingen van de glorieringen: als de damp zich net gevormd heeft, is de glorie groot (zijn de druppels dus nog klein) en blijken de ringen aanmerkelijk sterker gepolariseerd dan wat later, wanneer de glorie kleiner is geworden. In principe is het zelfs mogelijk dat er soms geheel ongepolariseerde glories optreden. Deze kunnen zich dan bovendien van de gewone glories onderscheiden doordat hun centrum *donker* is in plaats van licht. Of deze glories vaak in de natuur gevormd worden is niet bekend.

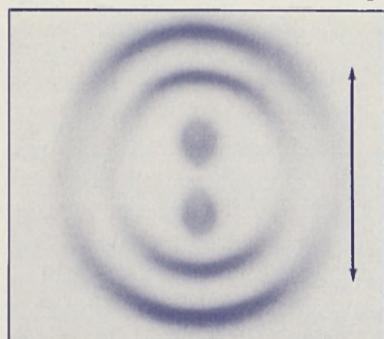


fig. 34 *De glorie, gezien door een verticaal filter. De binneste structuren zijn donker en blauwachtig.*

De verklaring van de glorie is niet eenvoudig: bij waterdruppels is het niet voldoende alleen breking, weerkaatsing en buiging van het licht in rekening te brengen, maar spelen ook oppervlaktegolven (§ 81) een essentiële rol bij de vorming. Slechts dank zij het bestaan van deze laatste kan de glorie in minuscule waterdruppeltjes gevormd worden: zonder deze zou de brekingsindex te klein zijn. Deze oppervlaktegolven zijn ook verantwoordelijk voor de zeer merkwaardige polarisatieverschijnselen bij glories, die hun analogon niet kennen in de atmosferische optica.

43 De krans, de heilenschijn en iriserende wolken

Tot slot van dit hoofdstuk beschrijven wij kort drie verschijnselen die geen van alle polarisatie vertonen, maar in een hoofdstuk over optische verschijnselen niet mogen ontbreken.

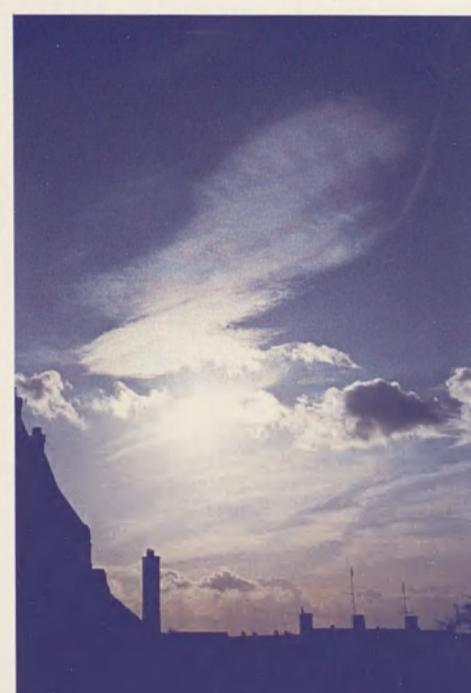
De ongepolariseerde *krans* verschijnt als een helder, gekleurd aureool rond de lichtbron (plaat 42). Hij is veel kleiner dan een halo en buitengewoon lichtsterk. Men ziet hem het gemakkelijkst bij de maan of een aardse lichtbron; bij de zon maakt zijn helderheid het waarnemen zonder hulpmiddelen onmogelijk. Toch zijn ze juist dan het fraaist. Het meest worden ze bij de maan opgemerkt; het is bijna het enige optische verschijnsel dat bij maanlicht zijn kleurrijkdom behoudt. Men ziet hem verschijnen als er zich dunne wolken voor de maan bevinden; hij ontstaat door buiging aan de wolkendeeltjes en zijn centrum is helderwit. Hieromheen verschijnen de gekleurde ringen, die zich onder gunstige omstandigheden een aantal keren kunnen herhalen, maar dan steeds lichtzwakker zijn. De grootte van de ringen is omgekeerd evenredig met de afmetingen van de deeltjes, zoals ook bij de glorie het geval is. Als er een tweede wolk voor de maan schuift, constateert men vaak een verandering in de diameters van de ringen; nabij de rand van een wolk is de krans vaak ietwat eivormig (ook bij de glorie treedt dit op). 's Nachts, in mist, ziet men vaak een krans verschijnen rond een lantaarnpaal of rond de koplampen van een auto. Verder zien wij door beslagen ruiten vaak kransen; nu is het centrum echter *donker*. In dit geval ontstaan zij niet door buiging, maar eerder door interferentie-effecten van licht dat door verschillende 'gaatjes' tussen de druppels heen is gekomen. Atmosferische kransen kunnen zowel in ijs- als waterwolken gevormd worden, maar in dit laatste geval zijn de gekleurde ringen het best ontwikkeld. Zelfs rond heldere planeten als Venus of Jupiter ziet men wel de krans; hier verschijnt echter slechts het heldere, ongekleurde centrum en zijn de kleurige ringen te lichtzwak om ooit gezien te worden. Anderzijds is een volledige krans wel eens gezien rond de totaal verduisterde zon: de lichtbron was toen de corona (zie ook § 27).

De *heilenschijn* (plaat 44) ziet men als een wit aureool rond zijn eigen schaduw; het beste is hij te zien op bedauwd riet of gras. Dit verschijnsel doet enigszins aan de glorie denken, maar mist diens kleuren en regelmatige structuur. Bij zijn vorming spelen een aantal effecten een rol, zoals totale reflecties in gedefoorneerde druppels en het feit dat men met de zonnestralen meekijkt, en hierdoor nooit de onderlinge schaduwen van de grassprietjes kan zien (juist zoals wij op de volle maan nooit schaduwen zullen zien; de volle maan is dan ook niet minder dan zo'n negen maal helderder dan de halve maan!). Ook op droog gras of sommige ruwe oppervlakten ziet men dus de heilenschijn, maar hij is dan zwakker dan bij bedauwd gras. Anderzijds merkten maanreizigers juist een sterke heilenschijn op: glasachtige bolletjes in het dorre maangruis hebben hier de rol van de druppeltjes overgenomen. Net als de krans, is ook de heilenschijn ongepolariseerd.

Iriserende wolken zijn wolkenbanken die in parelmoerachtige kleuren oplichten, vaak in een geschubde structuur (plaat 43). Dit gebeurt vooral bij lenticulariswolken; ze mogen zich niet te ver van de zon bevinden. Een donkere bril is bij het waarnemen vaak een onmisbaar hulpmiddel. Bij het ontstaan schijnt meestal interferentie in ijskristallen een rol te spelen. Polarisatie treedt hierbij niet op.



Plaat 42 De krans, hier rond de zon (§ 43). Van dit verschijnsel is hier slechts een deel te zien. De stervorm van de zon is het gevolg van overstraling in het fototoestel. De verschijnselen die op deze pagina zijn afgebeeld zijn geen van alle gepolariseerd.



Plaat 43 Iridescente wolk, hier recht boven de zon (§ 43). (Foto P. P. Hattinga Verschure)



Plaat 44 De heiligschijn op bedauwd riet, rond het hoofd van de schaduw van de fotografe (§ 43). (Foto I. Können-Jongman)

Het landschap en voorwerpen om ons heen

44 Inleiding: een globaal overzicht

De natuur, met zijn vlakten en begroeiing, zijn dieren en insecten, en zijn al dan niet door mensenhanden gemaakte voorwerpen vertoont een grote afwisseling aan lichteffekten en kleuren. Bijna al dit licht ontstaat door weerkaatsingen aan een veelheid van voorwerpen om ons heen; de kleuren die wij te zien krijgen worden bepaald door de aard van de voorwerpen in onze omgeving, terwijl het algemene uiterlijk van de natuur en het spel van licht en schaduw eerder afhangt van de belichting die op dat moment optreedt. Al deze factoren zorgen voor een enorm scala van mogelijkheden: zandvlakten, bossen, steden, grasland en bergen hebben een zeer verschillend, karakteristiek uiterlijk, dat weer sterk kan veranderen als bijvoorbeeld de zon plaatsmaakt voor een zwaar bewolkte lucht, of als de lucht opklaart na een bui en de zon dan een natgeregende wereld beschijnt.

Als men een globale beschrijving van de kleuren om ons heen maakt, zal men bemerken dat kleuren als groen (gras, begroeiing) en geel (zand) het beste vertegenwoordigd zijn in het landschap; kleuren als paars, roze of oranje komen veel minder voor. Vooral in de winter is dit duidelijk. In andere sezoenen blijkt dat het vooral de bloemen, vlinders, kevers en insecten zijn die voor een bonte kleurschakering kunnen zorgen, waarbij iedere kleur wel ergens te zien is. Toch blijft het globale beeld gelijk: enkele kleuren (groen e.d.) zijn overheersend aanwezig; andere kleuren vertonen zich, zij het opvallend, slechts op bepaalde geïsoleerde objecten in het landschap.

De polarisatieschakeringen in het landschap vertonen veel overeenkomst met zijn kleurschakeringen. Daar verreweg het meeste licht afkomstig is van weerkaatsingen aan allerhande voorwerpen, is de overheersende polarisatie lineair, en tangentieel ten opzichte van de zon bij onbewolkte lucht. Gladde of gepolijste voorwerpen vertonen een witte glans, die sterk gepolariseerd is, maar bij ruwere oppervlakten is zo'n glans afwezig en hun polarisatie is zwakker. Dit verandert echter na een regenbui: alle voorwerpen zijn dan bedekt met een dun laagje water en vertonen een glans alsof ze gepolijst zijn. De polarisatie van hun licht neemt ook aanzienlijk toe: de wereld na een regenbui is veel sterker gepolariseerd dan een dorre vlakte. Interessant is hierbij, dat één simpele regel (die van Umov, § 45, 77) bepalend is voor de sterkte van de polarisatie van vlakten; op deze regel zal in dit hoofdstuk dan ook vaak teruggekomen worden.

Anders dan bij de kleuren, is de polarisatie van voorwerpen meestal niet zo zeer gebonden aan de aard van het materiaal, maar eerder afhankelijk van de wijze van belichting. Direct door de zon beschenen voorwerpen vertonen een tangentiële polarisa-

tie; onder een zwaar bewolkte hemel of in de schaduw is de polarisatie daarentegen overwegend horizontaal gericht. Bij schemer is de lichtbron (de blauwe hemel) zelf al op sommige plaatsen sterk gepolariseerd waardoor afwijkende polarisaties in het landschap op kunnen treden in de vorm van andere polarisatierichtingen en soms het verschijnen van enige circulaire polarisatie. Toch kan men de wereld opvatten als tangentieel of horizontaal gepolariseerd te zijn; afwijkingen hiervan gebeuren slechts bij bepaalde voorwerpen of een speciale belichting. Zoals de bloemen en vlinders de kleurrijkdom van de natuur verhogen, zo zorgen dit soort afwijkingen en bijzondere omstandigheden voor een grotere variatie op het algemene polarisatiebeeld. Zo zijn ook vlakke, gladde voorwerpen als rustig water of metalen platen afwijkend gepolariseerd: zij werken als een spiegel en alleen de polarisatie van het licht dat toevallig in de richting van de waarnemer wordt gekaatst is dan van belang. Dit licht is lang niet altijd de zon zelf, maar kan even goed een stuk van de blauwe, gepolariseerde hemel zijn, en dit leidt dan tot een afwijkende polarisatie in een overheersend tangentieel gepolariseerde wereld. Wordt zonlicht niet weerkaatst, maar bijvoorbeeld gebroken, dan vertoont ook dit licht afwijkingen van het globale polarisatiebeeld.

Zoals gezegd is de wijze waarop polarisatie tot stand komt veel sterker afhankelijk van de belichting dan van de aard van het materiaal: bijna alle materialen transformeren bij weerkaatsing ongepolariseerd licht in hetzelfde soort lineair gepolariseerd licht, dat dus horizontaal of tangentieel gericht is. Slechts de sterkte van de polarisatie verschilt van materiaal tot materiaal. Ook op deze regel bestaat echter een exotische uitzondering: het weerkaatste licht van sommige kevers is bijna volledig circulair gepolariseerd, ongeacht de belichting! Deze singulariteit in de natuur kent zijn parallel niet bij de kleurverschijnselen.

Als geheel genomen is de polarisatie van het landschap en zijn voorwerpen wat zwakker en minder geschakeerd dan die van de hemel en de optische verschijnselen die wij in de vorige hoofdstukken behandelden. Anderzijds bestaat er nu een grote gevoeligheid van de polarisatietoestand voor belichting en vochtigheid, terwijl men, anders dan bij de optische verschijnselen, de globale polarisatie al grotendeels kan begrijpen aan de hand van slechts een paar simpele wetmatigheden.

45 Vlakten

Gras-, sneeuw-, zand- en andere vlakten vertonen alle een tangentiële polarisatie als ze beschenen worden door de zon. Het sterkst is ook hier de polarisatie op zo'n 90° van de zon (§ 72). Deze maximale polarisatie hangt echter af van het reflecterend vermogen: een donkere vlakte is sterker gepolariseerd dan een lichte vlakte. Dit is het zgn. *Umov effect*, dat optreedt bij een ruw materiaal (§ 77). Men kan gemakkelijk constateren dat sneeuw, gips, of wit zand een veel geringere polarisatie vertoont dan bijv. het donkere zand in een greppel of asfalt. Bij verschillende soorten wegen kan men dit effect moeite-loos zien; hier komen wij in de volgende paragraaf op terug.

Bij sommige vlakten (gras) kunnen de afzonderlijke deeltjes een witte glans vertonen, omdat ze toch nog vrij glad zijn. Deze glans is dan vaak intenser dan de eigen, groene kleur en sterk gepolariseerd. Met een polarisatiefilter in radiële richting verdwijnt deze glans bijna geheel, en ziet men alleen de eigen, warme kleur van deze vlakte. Ook bij boombladeren en dergelijke kan men dit vaak zien: deze vertonen vaak een sterkere glans dan bijvoorbeeld grassprieten (§ 49 en plaat 52-53 op blz. 76).

Regent een vlakte nat, dan is de glans, en dus ook de polarisatie veel sterker. Natte vlakten zijn dus glanzender (witter) dan droge vlakten, en alleen hierdoor al sterker gepolariseerd. Bovendien hebben natte voorwerpen een diepere kleur en zijn meestal veel donkerder, zodat volgens de regel van Umov ook die stukken, die niet toevallig een schittering in de richting van de waarnemer zenden, ook al sterker dan normaal gepolariseerd zijn! Duidelijk is dit te zien bij beton, zand, modder, straatstenen, grint, een rotsachtige bodem en vele andere voorbeelden. Vooral bij lichtere voorwerpen heeft men soms moeite de polarisatie in droge toestand te zien, terwijl dit in natte toestand geen enkel probleem oplevert (plaat 45-48).

Bij zware bewolking verandert de tangentiële polarisatie van vlakten in een horizontale; de polarisatiegraad neemt doorgaans wat af. Ook hier blijft het Umov effect geldig, en vertonen donkere vlakten de grootste polarisatie. Het enige verschil met een onbewolkte lucht is eigenlijk, dat hier de lichtbron wat diffuser is, en de 'gemiddelde lichtbron' zich recht boven ons in het zenit bevindt. De polarisatie is dus ook hier tangentieel ten opzichte van deze bron, en dit correspondeert dan altijd met een horizontale polarisatie-richting.

In de schemer hangt de polarisatie van vlakten af van de richting waarin wij kijken. Op zo'n 90° van de zon is deze verticaal gericht, omdat als belangrijkste lichtbron het sterkest gepolariseerde deel van de hemel dient, dat zelf al een verticale polarisatie vertoont. Hoewel ook andere delen van het hemellicht door zo'n vlakte in de richting van de waarnemer gekaast wordt, is deze bijdrage toch de belangrijkste. Anderzijds is de polarisatie in de richting van de ondergegane zon, of hier recht tegenover, wel horizontaal: hier is het meest relevante deel van het hemellicht minder gepolariseerd, zodat de situatie niet zoveel verschilt van een zwaar bewolkte lucht. Alleen zal nu de horizontale polarisatie wat sterker zijn, omdat de polarisatie van de lichtbron zelf al gemiddeld horizontaal gericht is. Ergens tussen deze richtingen bevindt zich weer een ongepolariseerd neutraal punt, dat ook optreedt in de atmosfeer of op water (zie § 14, 23 en 54).

Ook in de *schaduw* bij klaarlichte dag is het de blauwe hemel die als lichtbron dient, tenzij deze geheel door objecten is afgeschermd. Vlakten in de schaduw geven doorgaans een horizontale polarisatie te zien. Toch hoeft dit niet altijd het geval te zijn, omdat het gepolariseerd zijn van het hemellicht, hoewel zwakker dan bij schemer, voor afwijkingen kan zorgen. Omdat de polarisatierichting van het hemellicht nu echter een kleinere hoek met de horizon maakt, zijn deze afwijkingen niet zo groot dat ze onmiddellijk opvallen; veel opvallender is het contrast tussen de tangentiële polarisatie juist buiten de schaduw en de horizontale polarisatie in de schaduw (§ 46).

In al deze gevallen loont het zeker de moeite de polarisatierichting en sterkte van vlakten eens nauwkeurig te bestuderen, en waar te nemen hoe anders deze kan zijn voor verschillende windstreken, belichting en vochtigheidstoestand, en te kijken of men ook andere dan de bovenstaande polarisatie-effecten kan waarnemen. Interessant is bijvoorbeeld te zien hoe anders de polarisatierichting van een grasvlakte kan worden als deze niet direct door de zon, maar indirect, via de weerkaatsing tegen een ruit wordt verlicht. Een polariscoop is bij al dit soort waarnemingen vaak een nuttig waarnemingsinstrumentje, omdat hiermee ook een geringere polarisatie gemakkelijk te zien is. Het simpel combineren van polarisatie via glans, helderheid en de regel van Umov verhoogt hierbij op verhelderende wijze het inzicht in de wijze waarop lichteffecten in onze omgeving tot stand komen.



Plaat 45-48 Boven: de droge wereld. Onder: de natte wereld. De kleuren van de natte wereld zijn dieper en zijn polarisatie sterker (§ 45, 46).

46 Wegen en luchtspiegelingen

Een weg vormt eigenlijk een ideaal voorbeeld van een vlakte. Alle hiervoor genoemde effecten kan men fraai waarnemen: de tangentiële polarisatie in zonlicht, de horizontale in schaduw en bij zwaar bewolkte lucht, en de afwijkende polarisatierichting bij schemer. Hoe donkerder de weg, des te groter zijn polarisatie: nieuwe asfaltwegen vertonen de sterkste, betonwegen de zwakste polarisatie; bakstenen zitten hier ongeveer tussen in. Duidelijk zien wij de polarisatie toenemen als de weg nat is (plaat 45-48); vaak ziet men dan de wegmarkeringen beter met een polaroidzonnenbril op! Ligt er ijzel, dan is er een sterke glittering en polarisatie. Het contrast tussen de horizontale en tangentiële polarisatie in en buiten schaduwen (§ 45) kan men vooral bij natte wegen gemakkelijk waarnemen, speciaal als het de schaduw van een geïsoleerd object (een boom) betreft, de zon niet te hoog staat en men dwars op de zon kijkt (fig. 35).

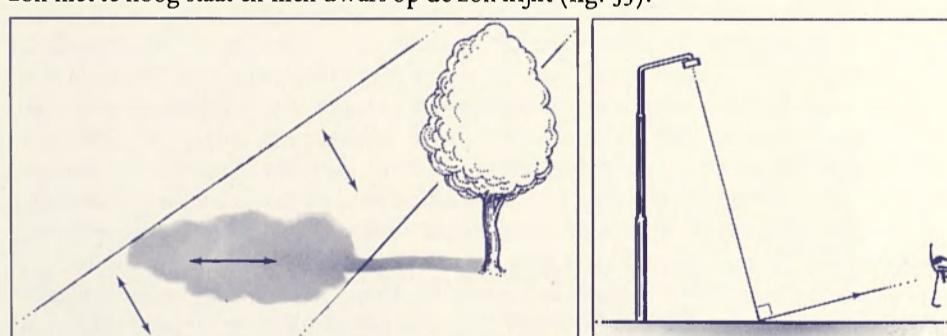


fig. 35 Een schaduw heeft een andere polarisatierichting dan de door de zon beschoten weg.

fig. 36 De gloed op een droge weg onder een lantaarnpaal is sterk gepolariseerd omdat het licht over ongeveer 90° gekaast is.

's Nachts verandert het uiterlijk van wegen; ze zijn dan verlicht door vele straatlantaarns. Natte wegen spiegelen deze lichtbronnen als een rustig meerje, en deze spiegelbeelden zijn dan sterk, horizontaal gepolariseerd. Droogt de weg op, dan verdwijnt dit spiegelende karakter en de weg vertoont een min of meer diffuse, maar toch sterk gepolariseerde gloed: de plek onder de lantaarnpaal geeft weerkaatsing onder zo'n 90° (fig. 36)! Terwijl bij een natte weg de spiegeling van een verre lantaarnpaal weinig gepolariseerd is (scherende spiegeling) en een dichtbij gelegen spiegelbeeld wel sterk gepolariseerd is, is dit bij een droge weg eerder omgekeerd.

Op warme dagen zien wij wel *luchtspiegelingen* optreden bij wegen. Het lijkt dan, alsof er zich in de verte een plas water bevindt, die oplost als men er dichterbij komt. Auto's en andere voorwerpen worden in deze 'plas' gespiegeld. Dergelijke luchtspiegelingen zien wij ook wel boven zandvlakten en boven de zee optreden. Luchtspiegelingen zijn echter geen echte reflecties, maar ontstaan door breking: hoe dichter men bij de grond komt, des te warmer is de lucht en des te kleiner zijn brekingsindex. Hierdoor worden scherend invallende lichtstralen geleidelijk zo van richting veranderd, dat zij de grond niet bereiken, maar weer naar boven toe verdwijnen (fig. 37). Dit geeft dezelfde indruk als een spiegeling. Bij een dergelijke geleidelijke breking (want dat is het) treden er *geen* polarisatie-effecten op, zodat ongepolariseerd licht ongepolariseerd blijft. Hierin onderscheidt een luchtspiegeling zich van een weerkaatsing op een echte plas water (§ 54). Als gepolariseerd licht een luchtspiegeling ondergaat, dan verandert er niets aan de polarisatiesterkte en -richting. Dit kan men zien als de luchtspiegeling van een sterk gepolariseerd stuk hemellicht zich vertoont.

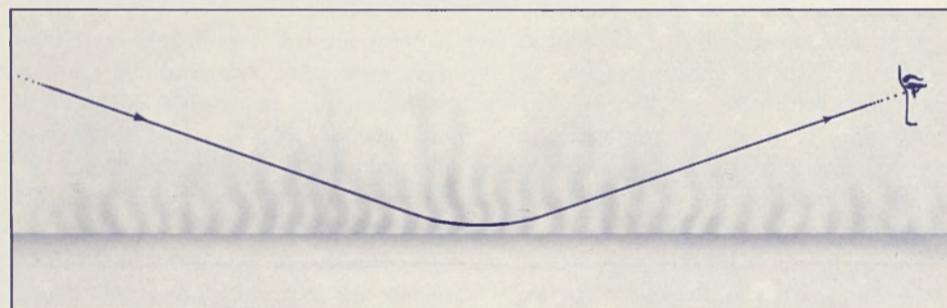


fig. 37 Vorming luchtspiegeling boven een hete vlakte.

47 Papier, matglas, huizen, stenen en bergen

Al dit soort voorwerpen vertonen een lineaire polarisatie van hun weerkaatste licht; de mate waarin dit licht gepolariseerd is hangt af van hun gladheid, hun natheid, hoe donker ze zijn (de regel van Umov), de in- en uitvalshoek van het licht en natuurlijk van de wijze van belichting. Wat betreft het laatste zullen wij ons in het onderstaande beperken tot belichting door de zon of een andere lichtbron: bij diffuse belichting zoals bij zware bewolking is de polarisatierichting in bijna alle gevallen horizontaal gericht (zie § 24 en 45). Voor de invals- en uitvalsrichting van het licht geldt ook nu weer, dat de polarisatiegraad altijd het grootst is als deze stralen een hoek van ongeveer 90° met elkaar maken.

Gladheid is echter een relatief begrip en verdient dus een nadere beschrijving. Het kan namelijk gebeuren dat een ruw voorwerp toch een glans vertoont als men er schuin

tegenaan kijkt; kijkt men er recht op, dan is deze afwezig. Dit ziet men bijvoorbeeld bij *krantepapier*, *matglas*, *grint* en vele andere tamelijk gladde voorwerpen optreden. Hoe schuiner men tegen een ruw voorwerp aankijkt, des te groter moet zijn ruwheid zijn om *geen* glans te vertonen! Bij blauw licht moet men schuiner kijken dan bij rood licht (langere golflengte) om de glans te zien; bij een bepaalde hoek zal men opmerken dat het spiegelbeeld van een ongekleurde lamp **rood** is. Deze waarneming lukt het beste met matglas. Kijkt men schuiner tegen dit glas, dan is het spiegelbeeld gewoon wit; bij rechtere invalshoek van het oog is het spiegelbeeld en de glans afwezig en ziet men slechts diffuse reflectie. De hoek waar dit gebeurt hangt af van de verhouding tussen de afmetingen van de oppervlakteruwheid en de golflengte van het licht.

Krantepapier is misschien wel het geschiktste object (naast matglas) om dit soort waarnemingen te verrichten, en de polarisatie van het licht te bestuderen. Kijkt men er schuin tegenaan dan verschijnt er een horizontaal gepolariseerde glans; kijkt men er rechter op, dan is deze afwezig. Ook dan is zijn diffuse licht gepolariseerd, en wel tangentieel ten opzichte van de lichtbron, zoals dit bij alle ruwe voorwerpen het geval is. Duidelijk kan men zien dat de zwarte inkt een aanzienlijk hogere polarisatiegraad heeft dan de witte, onbedrukte gedeelten van de krant. Bovendien zal men opmerken dat de glans bij de bedrukte gedeelten zich nog bij een rechtere kijkrichting manifesteert dan bij de onbedrukte gedeelten: drukinkt heeft een gladder oppervlak dan het krantepapier zelf.

Hout geeft aanleiding tot gelijksoortige waarnemingen; gewreven hout is zo glad dat het altijd een glans vertoont, die natuurlijk weer horizontaal gepolariseerd is. Haalt men deze glans met een filter weg, dan zien wij weer de warme eigen kleur van het hout. Ruw hout vertoont een dergelijke glans niet en vertoont een (zwakkere) tangentiële polarisatie. Tamelijk gladde planken e.d. vormen weer een tussenval: bij schuine kijkrichting hebben ze wel een glans, bij rechtere richting niet. In het eerste geval lijken ze dus glad, in het tweede geval niet, terwijl het materiaal toch hetzelfde is. Om ons heen bevinden zich een veelheid van voorwerpen die een dergelijk gedrag vertonen.

Bakstenen zijn nogal ruw, en vertonen dus ook bij zeer scheve kijkrichting geen glans. Ze vertonen een tangentiële polarisatie. Hierbij is het dus onverschilling of bakstenen op de grond liggen (zoals bij een weg) of een muurtje vormen: een *huis* vertoont dezelfde tangentiële polarisatie als zo'n weg. *Bergen* vertonen ook deze tangentiële polarisatie, maar vooral hogerotsachtige gebergten zijn zo glad dat ze een glans kunnen vertonen, die dus sterk gepolariseerd is. Hetzelfde zien wij gebeuren bij *grintstenen*, *leisteen* en vele andere keien om ons heen. Overigens ziet men *verre* voorwerpen vaak in een blauwachtige waas, ten gevolge van de strooiling van het zonlicht op de luchtkolom tussen de waarnemer en het voorwerp (§ 20). Deze waas is eveneens tangentieel gepolariseerd, zodat men de zichtbaarheid van deze voorwerpen kan verhogen door dit licht met een filter maximaal uit te doven, vooral als het wat dampig of heilig is. De eigen, eveneens tangentiële polarisatie van verre voorwerpen wordt door dit effect natuurlijk wat versluierd. Spiegeling op *metaal*, tenslotte, is eveneens gepolariseerd, zij het niet zo sterk als de glans van andere voorwerpen. Hoe donkerder het metaal, des te sterker is deze polarisatie (§ 76, zie ook § 48).

48 Onze auto

Bij auto's kan men een veelheid van polarisatieeffecten opmerken, omdat deze objecten vrij glad zijn, een heldere glans hebben, gedeeltelijk uit blank metaal bestaan en vaak

dubbelbrekende voor- en achterrauiten hebben. Men vindt hier dus een groot aantal effecten terug die men ook wel bij voorwerpen in het landschap kan aantreffen, maar omdat ze hier bij één enkel object verenigd zijn, is de auto de moeite van het apart bespreken waard.

De directe spiegeling van de zon (in de vorm van een heldere witte glimmende vlek op bijvoorbeeld het dak van de auto) is tangentieel gepolariseerd; is deze spiegeling afkomstig van een stuk blank metaal, dan is de helderheid ervan groter, maar de polarisatie geringer (§ 76). Andere gelakte metaalplaten werken als een spiegel waarin niet de zon, maar de lucht of de straat zich weerkaatst. Dit weerkaatste licht is dan horizontaal ten opzichte van het weerkaatsend vlak gepolariseerd, maar omdat bijv. bij deuren dit vlak verticaal, en bij het dak het vlak horizontaal ten opzichte van de weg staat, verschillen de polarisatierichtingen sterk ten opzichte van elkaar (fig. 38, zie ook § 51). Roteert men dus een filter, dan ziet men steeds een ander deel van de auto oplichten. Daar waar de glans maximaal is uitgedoofd is de kleur van de lak het diepst; als bij de ruiten de glans verdwijnt worden ze doorzichtig en zien wij de voorwerpen in de auto (plaat 49-50). Bij de voor- en achterrauiten zien wij met een filter bovenbien vaak kleurige structuren te voorschijn komen, die wij zonder filter niet of nauwelijks te zien krijgen. Deze kleuren worden veroorzaakt door de dubbelbrekende eigenschappen van dit veiligheidsglas. In § 52 en 53 behandelen wij waarnemingen die men aan dit soort materialen kan doen. De banden van auto's vertonen, als zij door de zon beschinen worden, een tangentiële polarisatie, zoals wij dat van ruwe oppervlakken kunnen verwachten. Deze polarisatie is behoorlijk sterk, hetgeen de regel van Umov voor donkere voorwerpen ook aangeeft.



fig. 38 Polarisatierichting op diverse vlakken van een auto.

Weerkaatst het blauwe, gepolariseerde hemellicht op een autodak, dan is de polarisatierichting van het weerkaatste licht ietwat gedraaid. Bij een steile invalshoek is dit vlak bovenbien gespiegeld (§ 87, plaat 51); kijkt men zonder filter in de richting van de Brewster hoek op dit dak, dan zien wij een donkere vlek als gevolg van de uitdoving van het verticaal gepolariseerde hemellicht (bij schemer) door horizontale reflectie (zie ook § 15); de glans is daar voor een groot deel verdwenen. Zo ziet men dus met het blote oog dat het hemellicht gepolariseerd is. Metalen delen (bumpers, deursluitingen e.d.) kunnen vooral bij schemering *circulaire* polarisatie vertonen, omdat het invallend licht lineair gepolariseerde hemellicht bij metaalreflectie kan worden omgezet in circulair licht (§ 91). Afgezien van de dubbelbrekende ruiten, die met een circulair filter kleuren vertonen als met een lineair filter, is dit het enige deel van een auto waar circulaire polarisatie zich manifesteert. Deze is onder gunstige omstandigheden zeer sterk: 'het licht van het chroom wordt uitgedoofd met een filter', iets wat men bij een metaal niet snel zou verwachten (zie ook plaat 6-7 op blz. 21).



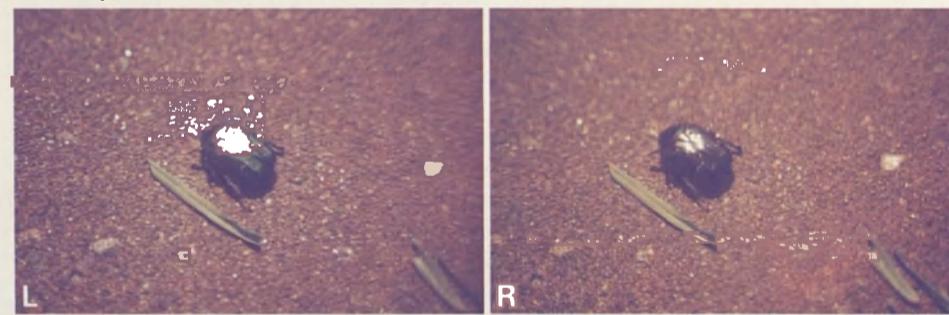
Plaat 49-50 De verschillende vlakken van een auto hebben ieder een andere polarisatierichting (§ 48).



Plaat 51 Bij een steile invalshoek spiegelt het polarisatievlak (§ 29, 48). Hier is dit gedemonstreerd met een gewone spiegel, waar het effect zich al bij een vrij scherende weerkaatsing vertoont (§ 91).



Plaat 52-53 Een bosje bladeren heeft een tangentieel gepolariseerde glans, die men met een filter kan uitdoven (§ 49).



Plaat 54-55 De gouden tor heeft een groenachtige metaalglans die linksdraaiend gepolariseerd is. L is linksdraaiend, R rechtsdraaiend filter voor de camera. De witte schittering blijft onveranderd zichtbaar; deze is lineair gepolariseerd (§ 50).

49 Planten, dieren en mensen

De polarisatie van het licht van deze objecten volgt in grote lijnen die van de dode natuur. *Bladeren* en dergelijke kunnen zo glad zijn, dat ze vooral bij schuinere invalsrichting van het licht een glans vertonen, die dus horizontaal gepolariseerd is. Een bosje heeft vele bladeren die in vele richtingen georiënteerd zijn: de polarisatie van de glans van het bosje als geheel is tangentieel ten opzichte van de zon (plaat 52-53). Andere bladeren, bloemen en verdere plantaardige materialen zijn vaak ruwer, hebben niet zo'n glans en vertonen dus minder polarisatie; hetzelfde geldt voor gladdere materialen die meer loodrecht door de zon beschenen worden. Bij afwezigheid van glans geldt weer: hoe donkerder, des te hoger de polarisatie (Umov).

Haar, zoals dieren die vaak in overvloed hebben, vertoont evenals mensenhaar en de *veren* van vogels een sterke glans die dus tangentieel gepolariseerd is. *Huid* vertoont eenzelfde polarisatie als steen of bladeren: de mate waarin hangt af van zijn gladheid en vochtigheid (transpiratie!). *Ogen* vertonen eveneens een glans die sterk gepolariseerd is. Het voorgaande geeft weinig nieuwe gezichtspunten: in het algemeen polariseren levende organismen het licht op dezelfde wijze als dode stof. Interessant is echter, dat stukjes huid, bot, insectenvleugels, nagels en andere substanties dubbelbrekend zijn ten gevolge van een gelaagde structuur. Tussen filters in vertonen deze dus kleuren (§ 93); vooral bij nagels is dit goed te zien. Welke organische materialen vertonen deze chromatische polarisatie nog meer?

Sommige tropische *vlinders* hebben een prachtige gekleurde glans die ontstaat door vele weerkaatsingen op het vleugelmateriaal. Hier kan het gebeuren dat een toevallige combinatie van reflecties het licht omzet in circulair licht – dit uit zich dan natuurlijk maar op een zeer klein plekje op de vleugel, en varieert sterk met de invalsrichting van het licht.

Insekten en *kevers* manifesteren zich meestal op dezelfde wijze als de andere dieren, en vertonen dus een tangentieel gepolariseerde glans. De enige uitzondering behandelen wij in § 50.

In feite bestaat er verder geen enkel verschil in de polarisatie van dode en van levende objecten, zodat men enkel met een polarisatiefilter niet zal kunnen vaststellen of er in een vlakte leven aanwezig is (geweest) of niet.

50 De circulair gepolariseerde glans van bepaalde kevers

Kevers die deze unieke eigenschap bezitten behoren alleen tot de keverfamilie der Scarabaeidae; tot deze familie behoren de gouden tor (*Cetonia aurata*), de meikever (*Melolontha spec.*), de junikever (*Rhizotrogus solstitialis*), het rozenkevertje (*Phyllopertha horticola*) en nog een aantal andere soorten. Deze kevers zijn geheel of gedeeltelijk zwart met een groen- of geelachtige glans; bij de gouden tor is deze glans over het hele lichaam aanwezig.

Het blijkt nu, dat deze glans uit volledig linksdraaiend circulair gepolariseerd licht bestaat! Met een linksdraaiend filter verschijnt de glans dus helderder dan zonder filter; bekijkt men zo'n kever met een rechtsdraaiend filter, dan is de glans geheel verdwenen en de kever zwart (plaat 54-55). Deze circulaire polarisatie ontstaat bij iedere belichting en ongeacht het al dan niet lineair gepolariseerd zijn van het invallend licht. Wel is het zo, dat bij invallend lineair licht van de juiste trillingsrichting andere reflecties onderdrukt kunnen worden, zodat het verschijnsel zich nog fraaier manifesteert.

Het mooist is deze glans wel te zien bij de gouden tor (die overigens meestal niet geel maar groenachtig is). Deze kever vertoont deze circulair gepolariseerde glans over zijn hele lichaam. De gouden tor kan men in mei, juni en juli aantreffen op aardbeiplanten, rozen, pioenen, seringen, appelbomen en op zandgronden. Hij doet uiterlijk enigszins aan de mestkever denken. Ook bij de meikever, junikever en het rozenkevertje kan men deze circulaire polarisatie waarnemen: de kop en andere zwarte gedeelten vertonen een groene glans van linksdraaiend licht. Andere delen van deze kevers, zoals de bruine vleugelschilden bezitten deze eigenschap niet, zodat men hier nauwkeuriger moet waarnemen om op deze kevers circulair licht te ontdekken. Deze drie soorten kan men in mei en juni in de natuur aantreffen; het rozenkevertje vooral in heide- of duinstreken, op kruipwilg en allerlei bloeiende planten, de mei- en junikever vooral bij eiken.
Helaas zijn kevers als de gouden tor in de loop van de jaren steeds zeldzamer geworden. Vroeger was de gouden tor zó algemeen, dat ze door de jeugd werd verhandeld op de bloemenmarkt in Amsterdam vanwege zijn fraaie glans. Tegenwoordig moet men vrij veel moeite doen om deze kevers in de vrije natuur aan te treffen. Natuurlijk kan men zijn wonderlijke circulaire polarisatie ook in een museum bestuderen: deze eigenschap blijft ook na de dood van een exemplaar aanwezig.

De oorzaak van dit circulaire licht is kort uiteengezet in § 82. Voor zover wij weten zijn dit de enige objecten in de natuur die invallend licht direct omzetten in circulair licht; door deze circulaire polarisatie onderscheidt men kevers van deze familie onmiddellijk van andere. Deze circulaire polarisatie is des te opvallender omdat deze vorm van polarisatie toch al zo zeldzaam is in de natuur, en omdat de omgeving waar deze kevers zich ophouden doorgaans geen spoor van circulaire polarisatie vertoont. De biologische functie van dit afwijkende fenomeen is vooralsnog niet bekend.

Het schijnt tenslotte, dat de natuur ook nog in staat is om zelfs op deze uitzondering nog afwijkingen te produceren: een enkel exemplaar weerkaatst geen linksdraaiend, maar rechtsdraaiend circulair licht! Dergelijke mutanten, die zich verder in niets hoeven te onderscheiden van hun soortgenoten, zijn natuurlijk uiterst zeldzaam.

51 Glazen voorwerpen, ruiten, diamant, kwarts en andere doorzichtige stoffen

De lichteffecten die dit soort objecten te weeg brengen hangen af van de vorm ervan. Hetenvoudigst zijn deze bij een vlak materiaal, zoals een spiegelruit. Gereflecteerd licht tegen een raam is vaak zo intens, dat men er niet meer doorheen kan kijken, als het tenminste aan de andere kant van het raam vrij donker is. Deze situatie doet zich voor als wij overdag een huis of een auto in proberen te kijken. Dit gereflecteerde licht is sterk horizontaal gepolariseerd, zodat men het met een filter voor een groot deel kan uitdoven: de ruit wordt doorzichtig en voorwerpen in het huis worden zichtbaar (plaat 56-57 en 4-5 op blz. 21). Nu is een polarisatiezonnenbril uitgerust met filters die verticaal georiënteerd zijn ten opzichte van de horizon om de glans van bijvoorbeeld waterplassen op de weg uit te doven. Ruiten liggen echter niet op het aardoppervlak, maar staan rechtop zodat hun reflectielicht verticaal gepolariseerd is ten opzichte van de horizon. Met zo'n zonnebril neemt men deze glans dus niet weg, maar wordt het binnenkijken juist bemoeilijkt - om de glans wel uit te doven moet de bril een kwart slag gedraaid worden (fig. 39).

Kijkt men van binnen naar buiten (van donker naar licht) door een ruit, dan vertoont

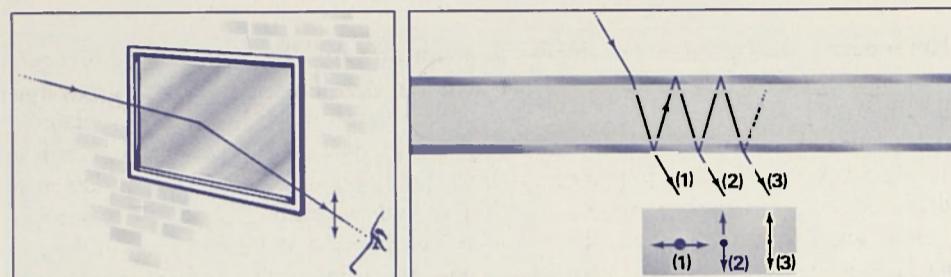


fig. 39 *Horizontaal gepolariseerd licht dat afkomstig is van een rechtopstaande spiegelruit is verticaal gepolariseerd ten opzichte van de horizon.*

fig. 40 *Lichtdoorgang door een dikke ruit. De extra beeldjes zijn tegengesteld gepolariseerd aan het directe beeld.*

dese nauwelijks reflecties: de voorwerpen binnen zijn te zwak verlicht. Het licht dat van buiten komt kan men dus ongehinderd zien. Ten gevolge van de brekingen van de ruit is dit licht nu gepolariseerd geworden, en wel verticaal ten opzichte van de ruit. Hoe schuiner wij door de ruit kijken, des te sterker deze polarisatie. Bij dik glas of dubbele ruiten wordt het binnenvallend licht ook nog gedeeltelijk enkele malen tussen de brekende vlakken heen en weer gekaast, en wel zodanig dat men bij een kleine lichtbron (een verre lantaarnpaal 's nachts) naast de lantaarn extra beeldjes ziet: hij lijkt dus dubbel of meervoudig. Terwijl het direct doorgelaten licht verticale polarisatie vertoont, zijn deze extra beelden horizontaal gepolariseerd. Draait men een filter voor het oog, dan worden dus beurtelings de lantaarn en de extra beeldjes uitgedooft (fig. 40).

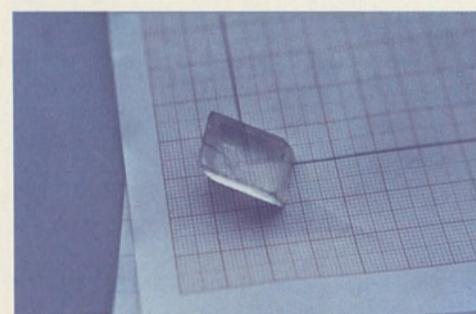
Objecten van een ingewikkelder vorm hebben een veel uitgebreider scala van mogelijkheden waarop licht via allerlei brekingen en weerkaatsingen naar ons toe gezonden kan worden. De inwendige reflecties die hierbij een rol spelen kunnen ook totaal zijn, met als gevolg een grote helderheid van dit licht; zulke lichtwegen manifesteren zich als heldere schitteringen in het object. Andere lichtwegen geven weer aanleiding tot kleurschifting, waardoor zo'n voorwerp 'regenboogjes' op het plafond kan projecteren, of de waarnemer een prachtig gekleurde schittering op het voorwerp ziet verschijnen, zoals iedereen weet die een glazen asbak of kroonluchter in huis heeft.

Het samenspel van brekingen en reflecties in zo'n voorwerp leidt tot een grote variëteit aan polarisatieeffecten. Totale reflectie (de helderste plekken op zo'n voorwerp) leidt niet tot polarisatie van het invallend licht, maar heeft anderzijds het vermogen lineair licht in circulair licht om te zetten (§ 90). Hoe groter de brekingsindex, des te groter is de kans hierop. Inderdaad vertonen sommige 'lichtpunten' in een door de zon beschene glazen asbak sterke circulaire polarisatie: het invallend licht is eerst door niet-totale reflecties lineair gepolariseerd, en vervolgens door totale reflecties in circulair licht omgezet. Bij scherven of andere glazen voorwerpen is dit al duidelijk te zien, maar bij diamant of rutiel (mineralen met een zeer hoge brekingsindex) is het veel sterker. Andere schitteringen in een transparant voorwerp zijn daarentegen ongepolariseerd of lineair gepolariseerd. In de schemering of de schaduw, waar de blauwe hemel als lichtbron dient, zijn echter meerdere schitteringen circulair gepolariseerd, omdat het binnenvallend licht hier zelf al lineair gepolariseerd is. Een diamant vertoont dan op meer van zijn facetten deze circulaire polarisatie. De draaizin van deze circulaire polarisatie verschilt van geval tot geval, en hangt af van de precieze lichtweg die de stralen door het materiaal hebben gehad: in principe is de kans op linksdraaiend licht precies even groot als op rechtsdraaiend licht.



Plaat 56-57 Een spiegelruit kan men doorzichtiger maken met een polarisatiefilter; voorwerpen binnen worden dan beter zichtbaar. Het donkerste deel van de rechterfoto correspondeert met reflectie op de Brewster hoek (§ 51, 74).

Optisch gezien kan men transparante objecten ruwweg in *twee* klassen indelen, te weten in *hoekige* en min of meer *ronde* voorwerpen. Een glazen sierezel behoort dan tot de tweede klasse, om een voorbeeld te noemen; een glazen asbak tot de eerste. Min of meer ronde voorwerpen hebben een optica die te vergelijken is met die van een regendruppel, en de kleurschifting die hierin kan optreden is die van de regenboog. Hierbij is de lichtweg dus breking-reflectie-breking, en treedt er lineair polarisatie van deze kleurige schitteringen op (§ 27). De polarisatierichting is dan tangentieel ten opzichte van de zon. Omdat het object nu echter meestal niet helemaal bolvormig is, kan het ook gebeuren dat de inwendige kaatsing totaal is – dan treedt er niet of nauwelijks polarisatie op. Plastic staven, glazen bollen of kunstvoorwerpen, een glas water zijn voorbeelden van objecten waarbij boven genoemde effecten op kunnen treden.



Plaat 58-60 Links: door calciet ('dronkemansglas') ziet men alles dubbel (§ 51). Onder: autoruiten vertonen vaak gekleurde vlekken als men er met een filter doorheen kijkt (links). Van buiten gezien zijn deze opvallender (rechts). Dit effect wordt veroorzaakt door de dubbelbreking van dit soort glas (§ 52).



Hoekige voorwerpen hebben daarentegen een optica als de ijskristallen: als bij de halo's kan hier het licht al geschift worden door twee brekingen zonder dat reflecties hierbij noodzakelijk zijn (§ 34). Als reflecties bij het ontstaan van kleureffecten toch zijn opgetreden, zijn deze vaak totaal geweest. Hier zien wij dan ook nauwelijks polarisatie optreden. Anders is het echter als het object dubbeltrekend is: de 'regenboogjes' op de muur zijn dan dubbel, en beide gepolariseerd met richtingen loodrecht op elkaar. Dit kan men bijvoorbeeld zien bij kwartskristallen. Met een filter kan men dan één van deze overlappende vlekjes zien uitdoven; draait men het filter, dan verschijnt het andere (plaat 36 op blz. 60). Met een ronddraaiend filter ziet men dus het gekleurde vlekje heen en weer schuiven. Hetzelfde kwamen wij in de atmosferische optica al tegen bij de bizonnen (ook zo'n gekleurde vlek, zie § 36). Bij kwarts is de dubbeltrekking echter zeven keer sterker, en dus ook de overlap van deze twee vlekjes veel geringer. Een mineraal als calciet ('dronkenmansglas') is nog veel sterker dubbeltrekend, en hier zijn de componenten geheel gescheiden (plaat 58). Zo'n mineraal projecteert dus twee maal zoveel 'regenboogjes' op het plafond als een glazen voorwerp van dezelfde vorm; paarsgewijze vertonen de bijbehorende vlekjes een sterke, onderling steeds tegengestelde polarisatie!

Bij plastic voorwerpen, tenslotte, verschijnen met een filter soms kleuren ten gevolge van chromatische polarisatie. Hierop gaan wij in § 53 nader in. Ook bij dubbeltrekende kristallen als calciet is dit wel te zien, vooral als het een sterk vertweelgd exemplaar betreft (§ 66) en er dus vele inwendige vlakken bestaan waartegen het licht kan kaatsen. Het ontstaan van deze kleuren is hetzelfde als bij autoruiten (§ 52, fig. 42).

52 Autoruiten en andere dubbeltrekende glazen

Er zijn maar weinig automobilisten die nooit geconfronteerd zijn met de kleurige 'vlekken', die ze in hun voorruit waarnemen als ze met een polaroidzonnenbril achter het stuur zitten (plaat 59). Men concludeert dan dat er 'iets' met deze ruiten aan de hand is: bij gewoon vensterglas verschijnen dit soort vlekken nooit. Waar wij mee te doen hebben is een zwakke dubbeltrekking van dit soort ruiten die zichtbaar wordt in gepolariseerd licht: *chromatische polarisatie* (§ 93).

Uit veiligheidsoverwegingen worden er bij de fabricage van autoglas inwendige spanningen aangebracht, door bijv. na verhitting het glas op enkele plaatsen geforceerd te koelen. Bij een ongeval versplintert zulk glas dan in kleine blokjes, die veel minder gevaarlijk zijn dan grote scherven. Door deze spanningen wordt het glas tevens optisch dubbeltrekend (het is plaatselijk 'opgerekeld') en als gevolg hiervan zien wij de genoemde vlekken verschijnen in gepolariseerd licht.

Kleurverschijnselen als deze ontstaan slechts, als het invallend licht al gepolariseerd is en men het object met een polarisatiefilter (zonnenbril) bekijkt. Dit gebeurt als men voor en achter de ruit een filter plaatst. In het bovenstaande geval fungert echter de blauwe lucht op zo'n 90° van de zon als bron van gepolariseerd licht, of weerspiegelingen op de weg. De vlekken verschijnen dan ook zonder dat er zich een filter voor het raam bevindt. Men zal bemerken, dat de vlekken afwezig zijn als men praktisch in de richting van de laagstaande zon rijdt, of als de lucht zwaar bewolkt is: de lichtbron is in deze gevallen zo goed als ongepolariseerd (zie § 24). Tegen donkere, of, nog beter, natte wegen vertonen ze zich duidelijk, maar tegen een lichte betonweg of een zandvlakte zijn ze niet of

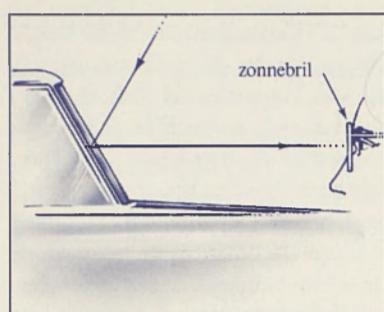


fig. 41 De polarisatie van het licht neemt toe door een inwendige kaatsing, waardoor de vlekken op de autoruiten beter te zien zijn dan van binnen af.

nauwelijks te zien. Wolken zijn minder sterk gepolariseerd dan de blauwe lucht (zie § 20): inderdaad zijn de vlekken zwakker.

Ook uitwendig, bij andere auto's verschijnen gekleurde vlekken op de ruiten; deze zijn vaak sprekender dan de vlekken in de ruit waar men doorheen kijkt (plaat 60). Dit is niet zo verwonderlijk: hier is het hemellicht weerkaatst tegen de achterzijde van het glas, waarbij de polarisatie flink kan toenemen (fig. 41). De vlekken worden dan sterker. – Natuurlijk wordt er door een autoruit evenveel licht via de voorkant van de ruit (dus uitwendig) naar ons toegekaatst als inwendig. Dit uitwendig gekaakte licht resulteert echter alleen maar in een gewone glans op de ruit, zoals die zich ook wel op andere delen van de auto aanwezig is. Deze glans kan men met een polarisatiefilter vaak bijna geheel onderdrukken, waarna de ruit alleen maar de vlekken vertoont ten gevolge van inwendige weerkaatsing, gecombineerd met chromatische polarisatie. In een dergelijke stand van het filter (verticaal dus, om de horizontaal gepolariseerde glans te onderdrukken) zijn de kleurpatronen op zijn fraaist. Men zal overigens bemerken dat draaiing van het filter een verandering van de kleuren ten gevolge heeft: bij een draaiing van 90° zijn de kleuren precies complementair geworden! Dit geldt voor al dit soort waarnemingen van kleurverschijnselen met een polarisatiefilter (§ 65-69, 92).

Lineair licht dat door een dubbelbrekende stof heengaat wordt ook gedeeltelijk omgezet in circulair licht (§ 93); de mate van omzetting hangt af van de kleur van het licht. Op autoruiten zien wij dus ook met een circulair filter kleurige vlekken verschijnen. Een links- en rechtsdraaiend filter geeft hier complementaire kleuren. De rest van de auto verandert echter niets, omdat gewone glans nu eenmaal met een circulair filter niet uitgedoofd kan worden. Dit dus in tegenstelling tot waarnemingen met een lineair filter, dat rondgedraaid wordt (§ 48).

Bij dubbelbrekende stoffen verschijnen de fraaiste kleuren als de polarisatie van het invallend licht gekruist is aan de polarisatie van het filter, dus bijvoorbeeld bij invallend horizontaal gericht lineair licht en een verticaal gericht lineair filter, of (wat men in de natuur niet snel zal aantreffen) invallend linksdraaiend circulair licht en een rechts-draaiend filter (§ 93).

Nadere beschouwing leert, dat men ook zonder filter deze vlekken wel kan zien, als men een autoruit uitwendig bekijkt. Dit treedt op als de blauwe, gepolariseerde lucht de ruit belicht en men schuin hier tegen aan kijkt: de inwendige spiegeling heeft dan de rol van het filter overgenomen (§ 7). Bij zware bewolking ziet men ze in de spiegeling van bijvoorbeeld de motorkap eveneens; hier fungert deze spiegeling als filter. Ook kan men bij zwaar bewolkte lucht deze vlekken zelfs direct zien, als men zeer schuin tegen de ruit aan kijkt, omdat dan de breking bij uittreding als 'filter' werkt. In dit laatste geval

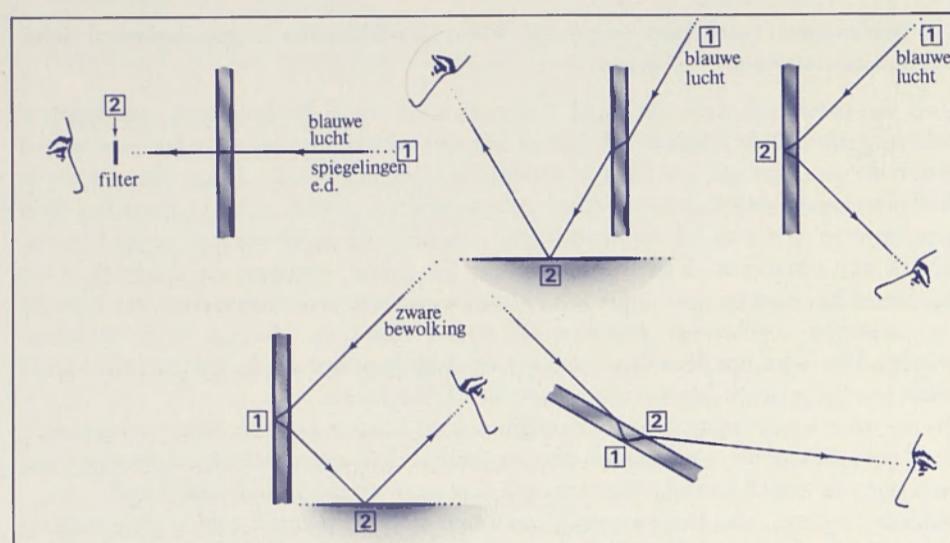


fig. 42 Verschillende omstandigheden waarbij gekleurde vlekken op autoruiten e.d. zichtbaar worden. Bij 1 wordt het invallend licht lineair gepolariseerd; met 2 is het tweede 'filter' aangegeven.

zijn de vlekken natuurlijk wel minder uitgesproken, omdat breking niet zo'n effectieve polarisator is als weerkaatsing. Al deze gevallen zijn geïllustreerd in fig. 42; de plaats waar het invallend licht wordt omgezet in lineair licht is aangegeven met 1, en de plaats waar het licht het tweede 'filter' passeert met een 2.

In een auto kan men ook wel deze vlekken zonder filter zien, als men bij blauwe lucht een glanzend vlak bekijkt en via deze spiegeling naar buiten kijkt. Terwijl de ruit dan zelf met het blote oog gewoon doorzichtig en helder is, vertoont zijn spiegeling de vlekken. Het doet wat onwezenlijk aan, dat een voorwerp en zijn spiegelbeeld een zo verschillend uiterlijk kunnen hebben (zie ook plaat 66).

Niet alleen autoruiten, maar ook *trein-* of *vliegtuigramen*, sommige *tafeltjes* en verstevigd *vensterglas* (in gymnasiekazalen en trappenhuisen bijv.) zijn dubbelbrekend gemaakt. Hieraan kan men dus analoge waarnemingen verrichten. Glas dat mechanisch onder spanning wordt gezet, zoals een glazen stolp die vacuüm wordt gezogen, wordt ook dubbelbrekend, hetgeen men met een gepolariseerde lichtbron en een filter gemakkelijk kan zien. De dubbelbreking is het sterkst op de plaatsen waar de grootste spanningen in het materiaal optreden; wordt deze spanning weggenomen (door bijvoorbeeld de leeggezogen glazen stolp weer vol met lucht te laten lopen), dan verdwijnt de dubbelbreking weer. In de industrie wordt van deze eigenschap gebruik gemaakt om zwakke plekken in materialen op te sporen. – Behalve glas, kan bijv. plastic en ijs ook tot chromatische polarisatie aanleiding geven. Dit behandelen wij in de volgende paragraaf. Tegenwoordig maakt men ook wel veiligheidsglas door verschillende lagen op elkaar te plakken. Dit soort glas, dat wel in autoruiten gebruikt wordt, vertoont niet of nauwelijks chromatische polarisatie, zodat men ook met een zonnebril geen vlekken ziet verschijnen (zie bijv. plaat 49-50). Er bestaat ook veiligheidsglas waarbij bepaalde delen extra van spanningen zijn voorzien, zoals het stuk ruit recht tegenover de bestuurder. Dit versplintert dan het eerst. Met een polarisatiefilter kan men zien, met welk soort veiligheidsglas men te doen heeft.

53 Ijsbloemen, ijsschilfers en plastic: kleurverschijnselen in gepolariseerd licht. Diademonstraties met cellofaan

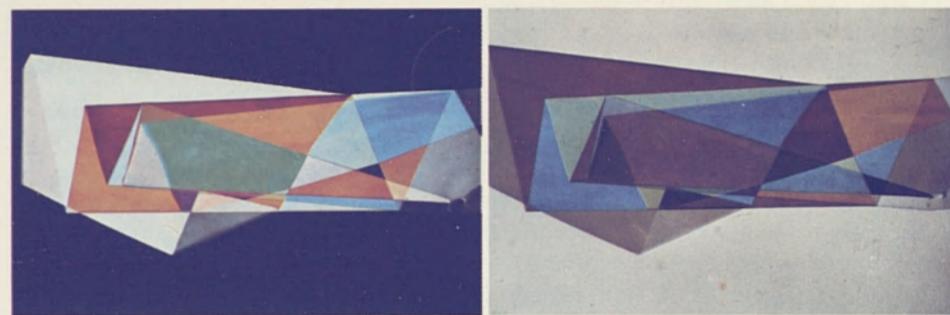
IJs is van nature een dubbelbrekend materiaal, zoals wij in het hoofdstuk over halo's al hebben gezien. Deze dubbelbreking leidt bijvoorbeeld bij bijzonen tot het verschuiven ervan, als men deze met een filter in verschillende standen bekijkt (§ 36). Plaatst men dit dubbelbrekend materiaal tussen twee polarisatiefilters, zodat ook het invallend licht gepolariseerd is, dan treedt er chromatische polarisatie op en verschijnen er dus kleuren, net als bij autoruiten. Kleine ijsschilfers uit de ijskast vertonen dit duidelijk. Ook hagelstenen kan men op deze wijze goed nader bestuderen: ze vertonen door hun typische ontstaanswijze regelmatige patronen die tussen filters op kleurige wijze zichtbaar worden. Het beste zijn deze structuren te zien als de hagelkorrels door de warmte van de filters zover zijn gesmolten dat alleen een plat schijfje over is.

Bij dit soort waarnemingen kan natuurlijk ook de blauwe lucht als bron van gepolariseerd licht dienen; het eerste filter is dan overbodig. Haal een schots uit een sloot en houd hem tegen de hemel: met een filter zien wij hem nu in allerlei kleuren oplichten!

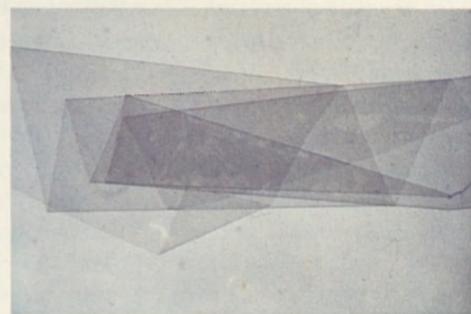
Ijsbloemen op een raam (tegenwoordig zeldzaam door het gebruik van centrale verwarming) kunnen op zeer fraaie wijze chromatische polarisatie vertonen: met een polarisatiefilter zien wij het witte ijs dan oplichten in onverwachte kleuren, mits er zich aan de andere kant een bron van gepolariseerd licht bevindt (de blauwe hemel, bijv., plaat 64). Plastic voorwerpen vertonen ook dubbelbreking en dus chromatische polarisatie, als ze tenminste inwendige spanningen bevatten. Dit is bijna altijd het geval bij dikke voorwerpen, die tijdens het stolproces niet helemaal regelmatig gekoeld zijn. In gepolariseerd licht zien wij op plaatsen waar deze inwendige spanningen aanwezig zijn, kleuren optreden. Als deze spanningen regelmatig door het voorwerp verdeeld zijn, zijn ook de kleurpatronen regelmatig (plaat 65). Bij dit soort voorwerpen kan men dezelfde waarnemingen verrichten als bij de autoruiten (zie § 52). Men zal bijvoorbeeld bemerken dat zijn spiegeling tegen bijv. tegeltjes of een ruit met het blote oog kleuren vertoont die het voorwerp zelf niet heeft (plaat 66). Kleine inwendige barstjes, die men vooral bij oudere plastic voorwerpen wel aantreft, vertonen ook vaak deze kleuren met het blote oog, omdat hier de weerkaatsingen erop de rol van de filters overnemen.

Dunne plastic zakjes zijn doorgaans niet dubbelbrekend, maar worden dit wel als ze met de hand opgerekt worden. Tussen twee polarisatiefilters zien wij dat de plaatsen waar oprekking heeft plaatsgevonden in fraaie kleuren oplichten. Men ziet dus als het ware de 'reklijnen' verschijnen.

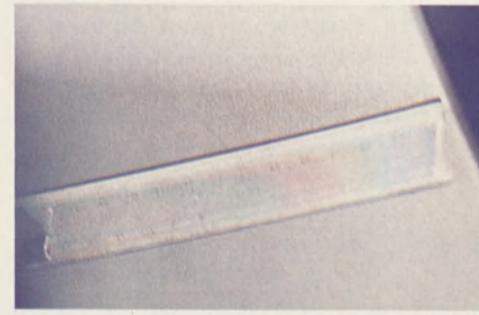
Cellofaanpapier, zoals dat om sigarettenpakjes heenzit, is ook dubbelbrekend ten gevolge van oprekking tijdens de fabricage. Deze oprekking is zeer regelmatig gebeurt, dus de dubbelbreking is overal praktisch gelijk. Een enkele malen gevouwen cellofaanpapiertje tussen polarisatiefilters geeft een schitterende indruk van de kleuren die verschijnen, en van wat er gebeurt als zo'n dubbelbrekend materiaal dikker is: de kleuren vertonen andere mengregels dan verf! Zie ook § 93. Een dia met een filter erin aan de kant van de lamp, en hiertegenaan een stuk gevouwen cellofaan geeft een fantastische demonstratie van wat polarisatie vermag: op het scherm zien wij het kleurloze cellofaan, maar als wij een tweede filter voor de lens houden vertoont ditzelfde cellofaan plotseling schitterende kleuren: onze 'polarisatieblindheid' is opgeheven! Draaiing van het filter geeft vervolgens een continu overgaan in andere nuances, tot de draaiing 90° is en alles complementair is geworden. Haalt men het filter weg, dan zijn wij weer polarisatieblind geworden en zien alleen maar het kleurloze cellofaan (plaat 61-63).



Plaat 61-63 Cellofaan vertoont in gepolariseerd licht kleuren, die het zonder filters niet heeft (§ 53, 65, 92, 93). Rechts: zonder filters. Boven: tussen gekruiste filters (links) en evenwijdige filters (rechts).



Plaat 64-66 Met een polarisatiefilter zien wij in ijsbloemen (rechts) en plastic voorwerpen (linksonder) kleuren verschijnen. Rechtsonder: de weerkaatsing van plastic voorwerpen vertoont kleuren die het voorwerp zelf niet heeft (§ 48, 53).



Met het bovenstaande zijn de mogelijkheden van chromatische polarisatie niet uitgeput; bij kristallen kan men nog veel meer zien. Omdat dit toch min of meer in laboratoriumomstandigheden moet gebeuren, behandelen wij deze effecten verderop in § 65-70.

54 Watervlakten: plassen, meren, de zee en de oceaan

Het aanzien en de polarisatie van watervlakten hangt, behalve van de belichting, ook sterk af van het al dan niet aanwezig zijn van golven op het water. *Vlak water* werkt als een groot, spiegelend oppervlak; zowel het spiegelbeeld van de zon als dat van de lucht is horizontaal gepolariseerd. Slechts de weerkaatsing van de blauwe, gepolariseerde lucht heeft een enigszins afwijkende polarisatierichting (zie ook § 48). Met een polarisatiefilter kan men dus de glans van het wateroppervlak grotendeels uitdoven: het water wordt dan doorzichtiger (zie ook plaat 4-5 op blz. 21). Vooral bij waterplassen op het wegdek is dan goed te zien dat de bestrating onder de plas veel beter zichtbaar wordt. De lineaire polarisatie van het weerkaatste licht is 100% bij weerkaatsing onder de Brewster hoek (§ 74), dus als men onder een hoek van zo'n 37° met het oppervlak kijkt (fig. 43). Kijkt men schuiner of loodrecht tegen het wateroppervlak (dus verderweg of dichterbij), dan is de polarisatie minder. – Bij schemer geeft de blauwe lucht, vooral op zo'n 90° van de zon, sterk gepolariseerd licht met een richting loodrecht op de horizon. Dit licht wordt dus minder sterk door het water weerkaatst dan het licht dat van andere delen van de hemel komt, en wel het minst bij weerkaatsing met de Brewster hoek. Hier zien wij dus zonder filter de 'donkere vlek' op het wateroppervlak verschijnen die al eerder ter sprake kwam (§ 15 en 48): links en rechts van deze vlek wordt meer licht weerkaatst omdat de polarisatie van de lucht daar geringer is, en onder en boven de vlek omdat het water daar het verticaal gepolariseerde hemellicht beter weerkaatst dan bij de Brewster hoek (plaat 10 op blz. 32).

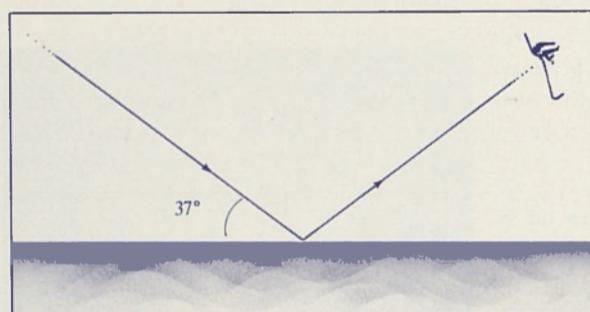


fig. 43 Weerkaatsing op water bij de Brewster hoek. Dit levert 100 % gepolariseerd licht op.

Golven ontstaan als de wind opsteekt; hoe harder deze wind, des te hoger de golven. Golven die door de wind in stand worden gehouden noemt men zeegang. Als de wind wegvalt blijven er op zee nog geruime tijd golven aanwezig, alleen wordt hun golflengte steeds groter. Deze weglopende golven noemt men deining; deze deiningsgolven kunnen dus een andere richting hebben dan de opnieuw, uit een andere richting opgestoken wind en de daarbij behorende zeegang. Op kleinere watervlakten zijn deze deiningsgolven snel verdwenen, maar op de oceanen kunnen ze nog dagen aanwezig zijn, zij het dat ze steeds lager en langer worden.

Golvend water ziet er heel anders uit dan vlak water: iedere plek op een golf weerkaatst licht uit een ander deel van de hemel naar onze richting (fig. 44). Omdat de zon verder weg het helderste deel van de hemel is, overheert deze weerkaatsing die van andere

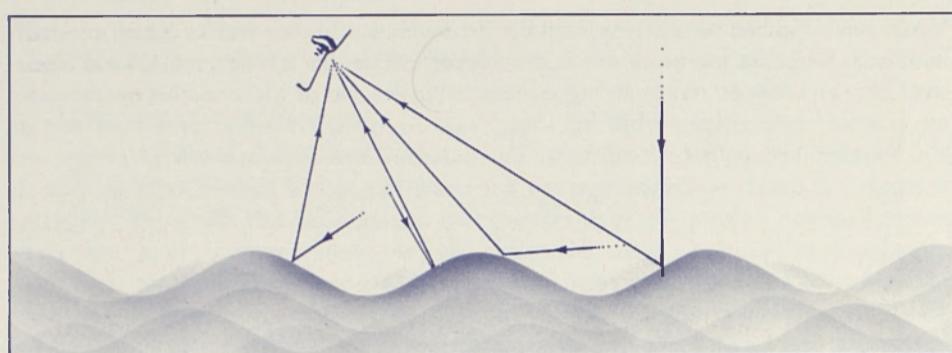


fig. 44 Golvend water weerkaatst licht uit alle richtingen naar het oog toe.

delen van de hemel volledig. De polarisatie van een golvend wateroppervlak is dan ook *tangentiell* gericht ten opzichte van de zon. Bij zware bewolking is dit anders, en ziet men wel het licht dat van alle delen van de hemel weerkaatst is. Gemiddeld over zo'n hele golf blijkt de polarisatie van het weerkaatste licht dan toch horizontaal te zijn. Blijkbaar wordt het licht van boven effectiever weerkaatst dan licht van links of rechts aan de hemel. De polarisatie is in dit geval echter nooit volledig, maar toch wel sterk. Bij schemer, tenslotte, zal men bemerken dat golvend water in de richting van de zon en hier tegenover horizontaal gepolariseerd is, als bij zware bewolking, maar op 90° van de zon verticaal, juist zoals de blauwe lucht zelf! Op zo'n 40° van de zon gaat de horizontale polarisatie over in verticale polarisatie; hier is de glans van het water ongepolariseerd. Men passeert dus een *neutraal* punt, zoals wij die o.a. ook aantreffen bij de blauwe hemel (zie § 14). Alleen is nu de 'negatieve polarisatie' (ofwel de horizontale polarisatie, om de parallel maar eens zo te trekken) veel sterker dan bij de blauwe lucht, met als gevolg dat het neutrale punt zich veel verder van de zon af bevindt. Hetzelfde zagen wij bij wolken (§ 23) en vlakten (§ 45) gebeuren.

Golven, die het strand bereiken gaan over in branding. Het witte brandingschuim is praktisch ongepolariseerd (denk aan de regel van Umov). Zeeschuim ontstaat ook bij een vliegende storm midden op zee; het kan dan de hele zee bedekken. Onder deze onaangename omstandigheden is het licht van de zee om ons heen dus eveneens ongepolariseerd.

55 De blauwe diepzee

Vooral de diepe tropische oceanen vertonen een prachtige, blauwe kleur – dit is in feite hetzelfde blauwe licht dat wij aan de hemelkoepel zien. Inderdaad verstrooien waterdeeltjes het zonlicht op dezelfde wijze als de luchtdeltjes in de atmosfeer, zodat het licht uit de oceaan dezelfde eigenschappen vertoont als het hemellicht (zie ook § 56). Het is dus blauw en gepolariseerd. Het blauwe oceaanlicht is derhalve zonlicht dat onder water verstrooid is en daarna uit de diepte weer omhoog schijnt. De polarisatie van het licht is maximaal voor licht dat loodrecht ten opzichte van de binnenvallende stralen verstrooid is; licht dat in de richting van deze stralen of er tegenin gestrooid wordt is ongepolariseerd. Ook nu is de polarisatierichting tangentiell ten opzichte van de zon, maar hierbij moet men bedenken dat de zon hoger lijkt te staan als men zich onder water bevindt, ten gevolge van breking van het zonlicht aan het wateroppervlak (zie ook § 56).

Vanaf een schip kan men deze polarisatie het beste zien bij een vlakke zee en een half-hoge zon. Vergelijk hiertoe de zee in de richting van de zon met de zee hier recht tegenover (fig. 45). Met de zon in de rug zal men bemerken dat de kleur van het oceaanwater onveranderd helderblauw blijft bij rotatie van een polarisatiefilter: men kijkt met de zonnestralen mee, en het strooilicht uit de oceaan is dus ongepolariseerd. Het enige wat verandert, is dat de weerkaatsingen *op* het water uitgedoofd kunnen worden. Aan de andere kant van de boot, dus in de richting van de zon, blijkt niet alleen deze spiegeling uitgedoofd te worden, maar bovendien de zee voor verticaal licht een diepe indigoblauwe kleur aan te nemen: ook het gepolariseerde strooilicht uit de diepten wordt nu voor een groot deel uitgedoofd! Deze proef vormt op zich zelf al een direct bewijs dat de blauwe kleur van de oceanen zijn oorzaak vindt in strooiling van het zonlicht door de watermoleculen zelf, in plaats dat hier sprake is van een eigen kleur van het water.

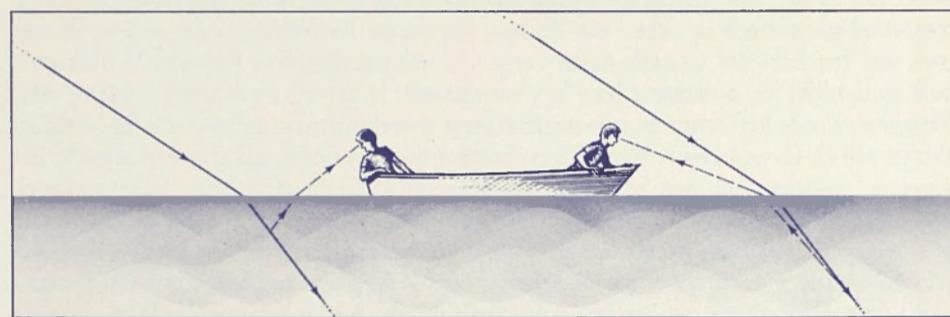


fig. 45 Kijkt men in de richting van de zon in het water, dan ziet men een gepolariseerde blauwe gloed als gevolg van strooiling van het zonlicht op de waterdeeltjes onder ongeveer 90° . Kijkt men met de zonnestralen mee, dan is de polarisatie afwezig.

56 De wereld onder water

Zoals iedere duiker weet, verschilt de wereld van de vissen geheel van de onze. Onder water lijkt alles veel rustiger; de wereld is vooral bij dieper, schoon water gekenmerkt door een blauwe gloed. De zon staat onder water hoger dan boven water: het zonlicht is door het wateroppervlak gebroken. Bij rimpelig water danst het zonnebeeldje op en neer. De zon is onder water niet langer ongepolariseerd, maar heeft ten gevolge van deze breking een verticale polarisatie gekregen die des te sterker is naarmate de zon lager op de horizon staat. Maximaal is deze polarisatie ongeveer 30%, dit gebeurt dus bij zonsopkomst of zonsondergang. Voor een duiker staat de zon dan echter helemaal niet op de horizon, maar op een hoogte van 41° ! Hij vertoont dan een sterke kleurschifting met rood aan de onderkant en groenblauw aan de bovenkant. Tevens vertoont de zon een sterke afplatting; hetzelfde ziet men optreden bij andere voorwerpen die zich dicht bij de horizon bevinden. Kijkt men lager dan deze 41° , dan wordt het licht van de zwak verlichte bodem totaal weerkaatst tegen het wateroppervlak en is het onmogelijk voorwerpen boven water te zien.

De blauwe kleur van de wereld onder water is het gevolg van strooiling van zonlicht door de watermoleculen, zoals de blauwe kleur van de lucht veroorzaakt wordt door strooiling van de luchtmoleculen. De polarisatie van dit licht vertoont dan ook hetzelfde beeld als dat van de blauwe hemel: tangentieel gericht en maximaal op 90° van de zon.

De maximale polarisatiegraad bedraagt ongeveer 60% en treedt op in rustig en schoon water. De polarisatie in turbulent water is aanzienlijk geringer en kan gemakkelijk terugvallen van 60% naar 30% of minder. Onder deze omstandigheden is de hoeveelheid licht onder water overigens groter, terwijl de wervels anderzijds dus de polarisatie verstoren. Ook als het wateroppervlak golven vertoont neemt de polarisatie onder water af, omdat het zonlicht door een golf in allerlei richtingen gebroken kan worden. Van parallelle zonnestralen kan dan onder water geen sprake meer zijn, met als gevolg deze afname van de polarisatie van het strooilicht onder water.

De overeenkomsten tussen het blauwe hemellicht en het blauwe strooilicht onder water gaan zo ver, dat ook onder water nabij de zon en zijn tegenpunt gebieden met negatieve polarisatie bestaan, en neutrale punten optreden. Ook hier is de negatieve polarisatie het sterkst in het gebied tegenover de zon, en kan de (negatieve) polarisatiegraad zo'n 15% bedragen.

Bij *zwaar bewolkt weer* verandert de polarisatierichting en -sterkte onder water. In plaats van met de zon hebben wij nu te doen met een diffuse lichtbron. Het licht heeft echter wel een gemiddelde invalsrichting: loodrecht op het water. Nu wordt dus ook de polarisatierichting onder water horizontaal, met een maximale sterke van 30% – een situatie die te vergelijken is met de polarisatie van de wolken zelf onder deze omstandigheden (§ 24). Ook op *grote diepten* (vele tientallen meters) is de zon niet of nauwelijks te zien, zelfs als het een heldere dag is. Het water wordt dan beschinen door licht dat al eens eerder, door hogere waterlagen, verstrooid is, en de verlichting is dus ook diffus, van boven gericht. De polarisatierichting is ook nu weer horizontaal, en de polarisatiegraad kan zo'n 20% bedragen.

Bij *schemering* kan men om dezelfde reden horizontale polarisatie van het licht onder water verwachten. Echter, nu is de lichtbron zelf al lineair gepolariseerd: als de zon zich in het westen of oosten onder de horizon bevindt, is de richting van deze polarisatie noord-zuid (§ 14, 86). Kijkt men nu onder water in noordelijke (of zuidelijke) richting, dan correspondeert de horizontale polarisatie van het strooilicht onder water met een west-oost richting, dus juist tegengesteld aan die van de lichtbron. Het invallend licht van de hemel wordt dus door deze strooiling onder water extra verzwakt; in westelijke of oostelijke richting zal dat niet het geval zijn. Een duiker zal dus met het blote oog moeten kunnen zien dat het strooilicht onder water bij schemer in noordelijke of zuidelijke richting zwakker is dan in het westen of oosten! Voor zover mij bekend, zijn dit soort waarnemingen (van intensiteiten en polarisatie bij schemer) niet of nauwelijks verricht, hetgeen een reden temeer vormt om het eens te proberen. Treden er onder deze omstandigheden ook afwijkende polarisatierichtingen op? Waarnemingen als deze, en ook in het algemeen waarnemingen van polarisatie onder water zijn niet zo moeilijk, omdat ze reeds bij een geringe diepte onder water al goed te verrichten zijn. De polarisatie van *voorwerpen* onder water zal weinig nieuws opleveren, maar het feit dat het *blauwe licht* onder water zo'n interessant scala van mogelijkheden biedt voor polarisatiawaarnemingen moet een uitdaging betekenen om de fascinerende wereld onder water ook eens met een polarisatiefilter te bestuderen.

Tenslotte nog het volgende. Behalve lineair licht kan er onder water ook nog circulair gepolariseerd licht voorkomen. Dit ontstaat dan indirect: door totale weerkaatsing van het aanwezige lineaire licht tegen de onderkant van het wateroppervlak; dit lineaire licht kan dan de blauwe gloed onder water of het weerkaatste licht van voorwerpen aldaar zijn. Eén zo'n totale weerkaatsing levert echter zelfs onder de gunstigste omstandigheden

niet veel circulair licht op; maximaal is de circulaire polarisatiegraad dan slechts 17%. Het lijkt evenwel niet onmogelijk dat bij golvend water licht *twee* maal gekaatst wordt tegen de onderkant van een golf voor het de waarnemer bereikt. In dit geval kan de circulaire polarisatiegraad aanzienlijk zijn en het circulaire karakter van het licht gemakkelijk waarneembaar. Onder de gunstigste omstandigheden (invallend licht volledig lineair gepolariseerd en de hoek van inval van het licht en het trillingsvlak van dit licht in de juiste positie ten opzichte van de weerkaatsende vlakken) kan de circulaire polarisatiegraad wel 62% bedragen na twee zulke reflecties! Men moet echter wel bedenken dat sterk circulair licht onder water slechts op zeer bepaalde gedeelten van zo'n golf te zien zal zijn. De kans op het aantreffen van links- of rechtsdraaiend licht is hierbij even groot (§ 90).

Nachtelijke lichtbronnen en kunstlicht

57 Inleiding: het uiterlijk van de wereld bij nacht

Als de zon zó ver is ondergegaan dat ook het schemerlicht verdwenen is, heeft de wereld een ware metamorfose ondergaan. In een diepe, maanloze nacht is er geen overheersende lichtbron meer, maar worden wij beschenen door talloze zwakke lichtpuntjes: de sterren. Voorwerpen om ons heen zijn nauwelijks te onderscheiden. Nu kan ieder lichtpuntje in principe alleen zijn eigen, karakteristieke polarisatie bezitten, maar het blijkt dat er in de wereld van de sterren niet veel gepolariseerd licht voorkomt. Sterk gepolariseerde lichtbronnen moet men echt zoeken: slechts enkele objecten aan de hemel stralen zulk licht uit. Door de zwakte van nachtelijke lichtbronnen als deze is het constateren van de polarisatie van zulk licht bovendien aanzienlijk moeilijker dan bij het heldere licht overdag.

Bij een echte donkere nacht – die zich in onze bewoonde wereld nauwelijks meer voorovert – kan men aan de nachtelijke hemel soms lichtende verschijnselen zien optreden die niet met het sterlicht zelf samenhangen. Hierbij doen wij op het poollicht, het zodiacale licht, de Gegenschein en het ionosfeerlicht; op heldere zomernachten komen hier nog de lichtende nachtwolken bij (§ 25). Enkele van deze verschijnselen blijken inderdaad gepolariseerd te zijn, hetgeen dan een verrassende uitbreiding kan vormen van hun fraaiheid. Helaas verhindert de maan, of het stadslicht, meestal het waarnemen van het zodiacale licht, de Gegenschein en het ionosfeerlicht, terwijl uitgebreid poollicht in onze streken zeldzaam is.

Behalve aan de hemel, verschijnen er bij maanloze nacht soms ook zwakke aardse lichtbronnen. Het lichten van de zee, lichtend hout dat half vergaan is, glimwormjes in het gras en de (tropische) vuurvliegjes zijn hiervan voorbeelden; bij moerassen verschijnen wel dwaallichtjes. Vuurstenen die tegen elkaar geslagen worden geven een blauwe ‘vonk’. In de meeste gevallen vertonen ook deze lichtbronnen nauwelijks of geen polarisatie.

Geheel anders ziet onze omgeving er uit als de maan wèl boven de horizon staat. Zijn koude licht overstraalt dat van de sterren; voorwerpen om ons heen zijn nu goed te zien. Het enorme verschil met een maanloze nacht ervaart men misschien wel het best tijdens een totale maansverduistering, als in een uur tijds dit overheersende maanlicht bijna geheel verdwijnt. Hoewel er eigenlijk geheel geen verschil is tussen de wereld bij zonlicht of maanlicht, zal iedereen toch moeten constateren dat de wereld bij maanlicht geheel anders op ons overkomt. 's Nachts is het meest opvallende object de maan zelf, en onze ogen dwalen hier voortdurend naar toe. Overdag wacht men zich er wel voor

recht in de zon te kijken, en hierdoor is het de verlichting van het landschap en de hemel om ons heen die als karakteristiek wordt ervaren. 's Nachts is de lichtbron (de maan) karakteristiek: de verlichting die hierdoor optreedt is eigenlijk secondair. Hierbij komt nog, dat het oog bij zwakke belichting nu eenmaal nauwelijks kleuren kan zien, zodat de nachtelijke wereld bij maanlicht op ons flets en wit overkomt. Deze factoren zijn er de oorzaak van dat de wereld bij maanlicht zo geheel anders op ons overkomt.

Omdat de belichting bij maanlicht toch in niets verschilt van die bij zonlicht, zijn de reflecties om ons heen en de lichtverschijnselen in de lucht die men kan waarnemen exact dezelfde. Alleen lijken nu dus bijvoorbeeld de blauwe lucht, de regenboog en andere verschijnselen kleurloos: slechts bij de allerhelderste optische verschijnselen, zoals de krans en de bijmaan zien wij wel de kleuren. Ook nu wordt onze blik eerder getrokken door deze heldere verschijnselen, die zich dicht bij de lichtbron (in dit geval de maan) bevinden: de prachtig gekleurde krans, die zich vlak om de maan vormt is een bekend verschijnsel: iedereen heeft hem wel eens gezien. Een maanregenboog daarentegen kent bijna niemand. Overdag, bij zonlicht, ligt dit precies omgekeerd, omdat bijna niemand rechtstreeks in de oogverblindende nabijheid van de zon kijkt om te zien of daar een krans staat, terwijl de regenboog zich opvallend en kleurrijk manifesteert, waar hij bij nacht flets en kleurloos is.

De polarisatie van het licht om ons heen bij maanlicht benadrukt nogmaals de essentiële gelijkheid van de belichting overdag en 's nachts. Zo zal men bijvoorbeeld gemakkelijk kunnen vaststellen dat het hemellicht bij maanlicht, ofschoon het melkwit lijkt, in polarisatie niets verschilt met de blauwe hemel overdag (§ 18); regenbogen sterk gepolariseerd zijn (§ 27); bijmanen verschuiven als men ze door een filter bekijkt (§ 36) enz. Kortom, bij maanlicht kan men precies dezelfde polarisatieverschijnselen verwachten van de hemel, de wolken, de optische verschijnselen en de wereld om ons heen als bij zonlicht zoals deze in de vorige hoofdstukken beschreven zijn.

In onze bewoonde wereld is het echter meestal van ondergeschikt belang of de maan al dan niet boven de horizon staat: het kunstlicht van de straatlantaarns en uit de huizen overstraalt al het andere licht. Kunstmatige lichtbronnen, zoals TL-buizen of TV-schermen geven gepolariseerd licht af; ook verlichte ramen van woningen e.d. vertonen polarisatie ten gevolge van brekingen aan het vensterglas (§ 63 en 64). Weerkaatst licht van straatlantaarns tegen de straten is ook gepolariseerd; dit werd reeds besproken in § 46.

Verwijdert men zich van een dorp of een stad, dan ziet men nog lang de gloed van het stadslicht, vooral bij een bewolkte lucht. Ook hier treedt polarisatie bij op! De duizenden lichtbronnen in de stad werken nu samen tot één lichtbron, en de strooiling tegen de wolken of de lucht heeft dezelfde kenmerken als wanneer die door een willekeurige andere lichtbron, als de zon of de maan gebeurt.

Behalve de zon zijn er weinig natuurlijke lichtbronnen zo helder dat ze in staat zijn het stadslicht te overstralen. De lichtzee van een stad is dus 's nachts overheersend; alleen een grote vuurzee en een bliksemachtergrond (of andere vonken) zijn zo lichtsterk dat het stadslicht erbij verbleekt. Vuur en elektrische ontladingen zijn niet gepolariseerd; al waren ze dat wel, dan was deze bij bliksem nauwelijks vast te stellen vanwege de kortstondigheid van de ontlading. Bij een groot onweer realiseert men zich opnieuw hoe sterk meteorologische omstandigheden van invloed kunnen zijn op de wijze waarop de wereld zich aan ons manifesteert: er is nauwelijks een grotere tegenstelling denkbaar met een heldere, maanloze hemel.

Uit deze beschrijving van de nachtelijke wereld blijkt dat deze, met zijn vele mogelijke lichtbronnen een enorme variatie in waarnemingsmogelijkheden biedt, maar dat sterke polarisatie bij deze lichtbronnen niet zo veelvuldig voorkomt. De wereld 's nachts vertoont beslist minder polarisatie dan overdag, maar als men erop bedacht is blijken enkele lichtbronnen, of enkele delen van een lichtbron, toch sterke lineaire polarisatie te kunnen bezitten. – Dit is des te opvallender omdat zo'n lichtbron zich juist hierdoor onderscheidt van de andere.

58 Sterren, planeten en andere hemellichamen

Tussen een gemiddelde *ster* en de *zon* bestaat geen wezenlijk verschil: het zijn beide enorme gloeiende gasballen in de wereldruimte, die een geweldige hoeveelheid licht uitzenden. Omdat onze afstand tot de sterren zoveel groter is, zien wij deze slechts als nictige lichtpuntjes die overdag volledig overstraald worden door het licht van de meest nabijgelegen ster: de zon. Zoals deze laatste ongepolariseerd licht uitzendt (§ 79), zo is ook het sterlicht ongepolariseerd. Op zijn lange weg naar ons toe ontmoet het sterlicht echter vele, kleine stofdeeltjes, die door magneetvelden in de ruimte een bepaalde oriëntatie hebben aangenomen. Hierdoor komt het sterlicht toch enigszins gepolariseerd op Aarde aan, maar deze polarisatie is zó zwak (ten hoogste enkele procenten) dat dit met eenvoudige hulpmiddelen onmogelijk te zien is (§ 84).

In tegenstelling tot de zon en de sterren, zenden de maan, de planeten en kometen zelf geen licht uit, maar weerkaatsen zonlicht naar ons toe. Hier kan men dus lineaire polarisatie verwachten, vooral als de weerkaatsing onder zo'n 90° geschieft, dus als het hemellichaam zich in eerste of laatste kwartier bevindt. Hiertoe zijn echter alleen de maan, Mercurius, Venus, de kometen en ook de kunstmanen in staat. De *buitenplaneten* (Mars, Jupiter, Saturnus enz.) zijn voor ons altijd bijna 'vol', en vertonen alleen al op grond hiervan nauwelijks polarisatie: ten hoogste enkele procenten, dus niet zichtbaar met eenvoudige hulpmiddelen.

Het oppervlak van de *maan* bestaat uit ruwe gesteenten en stof. De polarisatie hiervan is lang niet zo sterk als men van een glad, spiegelend vlak kan verwachten. De maximale polarisatiegraad treedt op als de maan iets meer dan half verlicht is. Over de hele maan genomen is deze echter niet meer dan zo'n 10%. De polarisatierichting is tangentieel ten opzichte van de zon, dus 'van boven naar onder' gericht. De polarisatie is moeilijk te zien, omdat de maan zo'n klein object is. Donkere gebieden zijn sterker gepolariseerd dan lichte (denk aan de regel van UMOV); de polarisatiegraad kan hier ongeveer 20% bedragen. Dit is vergelijkbaar met die van de aardse zandvlakten.

Het *asgrauwe licht* van de maan (het oplichten van het donkere gedeelte van de maan) blijkt ook zwak gepolariseerd te zijn. Ook hier is de polarisatie maximaal op eerste en laatste kwartier, als dit licht al vrij zwak is. De maximale polarisatiegraad is ook ongeveer 10%. Het asgrauwe licht is afkomstig van de Aarde, met zijn oceanen, wolken en vlakten. De polarisatie van het licht van de *Aarde* als geheel kan zeer aanzienlijk zijn (zo'n 40% maximaal), maar bij weerkaatsing tegen de met stof bedekte maan verliest dit licht een groot deel van zijn polarisatie (§ 89).

De *volle maan* is ongepolariseerd: de zonnestralen worden dan loodrecht door het maanoppervlak naar ons toe gereflecteerd. In deze toestand komt tijdens een *maansverduistering* geen verandering.

Kometen kunnen een polarisatiegraad van enkele tientallen procenten bezitten onder gunstige omstandigheden. Het meeste licht van een komeet komt van de staart; ook hier is dit zonlicht, dat door de gasmoleculen naar ons toe gestrooid wordt. Sommige *kunstmanen* kunnen eveneens sterk gepolariseerd zijn, tot wel 60% of meer toe. Het waarnemen van deze polarisatie is echter niet zo gemakkelijk bij deze toch vrij zwakte, snelbewegende objecten. De sterkte van de polarisatie van kunstmanen hangt af van het materiaal waaruit ze zijn gemaakt. Er zijn ook vele kunstmanen die nauwelijks polarisatie vertonen.

De polarisatie van Mercurius is ongeveer gelijk aan die van de maan: maximaal zo'n 10%. Inderdaad zijn de oppervlaktestructuren van deze twee hemellichamen vergelijkbaar. Bij de veel lichtzwakkere Mercurius is het waarnemen van deze polarisatie nog veel moeilijker dan bij de maan, en voor amateurs praktisch onmogelijk. Ook *Venus*, met zijn dikke atmosfeer is nauwelijks gepolariseerd: zijn polarisatiegraad is zelfs nog lager dan die van Mercurius.

Naast de boven genoemde objecten blijven er maar weinig kandidaten aan de nachtelijke hemel over waar men polarisatie kan verwachten. Sommige *gaswolken* in de ruimte lichten op omdat zij licht verstrooien dat afkomstig is van een nabijgelegen ster; dit licht is dus gepolariseerd. In de praktijk is de polarisatiegraad toch vrij laag (meestal ongeveer 20%) en buitengewoon moeilijk vast te stellen bij deze lichtzwakke objecten. Een voorbeeld van zo'n wolk is VY CMa in het sterrenbeeld de Grote Hond.

Een interessante uitdaging vormt echter wel de polarisatie van de *Krabnevel M1* in de Stier. Dit is een restant van een supernovaexplosie die in 1054 plaatsvond; de toen ontplofte ster is nu de beroemde pulsar die zich in deze nevel bevindt. Het licht van de Krabnevel blijkt geen verstrooid licht te zijn, maar synchrotronstraling (§ 98); dit is plaatselijk sterk gepolariseerd (tot zo'n 70% toe!). De richting van de polarisatie hangt af van die van de magneetvelden ter plaatse, en deze kan sterk variëren van plaats tot plaats. De sterkste polarisatie vindt men bij de randen van de nevel, die overigens niet zo lichtsterk zijn als het centrum. Als men deze nevel met een filter bekijkt, en dit rond draait, verandert hij van vorm (plaat 87-88 op blz. 114). Voor het waarnemen van dit effect heeft men wel een flinke kijker nodig, en dient men er voor te zorgen dat het filter zich vóór de opvangspiegel bevindt, zodat de polarisatie niet verstoord wordt. Makkelijk is deze waarneming niet, maar de wijze waarop de polarisatie zich manifesteert maakt een poging zeer de moeite waard. Naast de zonnecorona (§ 19) is dit eigenlijk het enige astronomische object met een sterke polarisatie.

59 Poollicht (plaat 75 op blz. 104)

Bij ons helaas een zeldzaam verschijnsel, maar verder naar het noorden, in Noord-Amerika en aan de Zuidpool veelvuldig te zien. Het bestaat uit oplichtende oppervlakten, bogen of banden die soms een karakteristieke gordijnachtige structuur hebben en soms ritmisch oplichten. Het licht komt van zeer grote hoogten in de atmosfeer (100-300 km). Vaak zijn poollichten niet erg lichtsterk (als de melkweg), maar soms kan het verschijnsel buitengewoon helder worden. In dit laatste geval zijn ook fraaie kleuren waarneembaar.

De kleur die het verschijnsel aanneemt blijkt nauw samen te hangen met de hoogte waar het licht vandaan komt. Het hoogste poollicht is rood, het lagere deel groen en het laagste deel (op ± 95



Plaat 67 Het zodiakale licht, hier gezien vanaf enige hoogte boven de maan door het ruimteschip Apollo 15. Zijn licht is gepolariseerd (§ 60). (Foto National Space Data Centre, verkregen door bemiddeling van C. Titulaer)

km) zendt meestal paarsachtig licht uit. Op de overgang van groen naar rood lijkt het licht soms oranjeachtig of geel tengevolge van de menging van het groene en rode licht. Het licht is afkomstig van moleculen en atomen die 'aangeslagen' zijn door snelle elektronen en atomen van de zon; bij hun verval zenden zij karakteristiek licht uit. Het paarse licht is hoofdzakelijk afkomstig van N_2 en N_2^+ moleculen, deze vervallen in een zeer korte tijd (10^{-8} sec). In de hogere lagen van de atmosfeer zien wij hoofdzakelijk groen licht van zuurstofatomen; deze overgang is 'verboden' en de atomen vervallen pas na gemiddeld 0,7 sec. Eerst waar de atmosfeer zo ijl is dat deze atomen kunnen vervallen vóór zij met andere deeltjes botsen wordt dit licht dominerend. Bij een pulserend poollicht kan men deze lange levensduur soms waarnemen: poollichtstralen die snel langs de hemel trekken hebben een paarse voorkant (van het moleculaire licht) en een groene staart. Op nog grotere hoogte kan een atoom nog langer rondvliegen zonder te botsen. Hier zien wij het rode licht van een andere verboden zuurstofovergang, die niet minder dan gemiddeld 2 minuten nodig heeft om te vervallen. Op grotere hoogten is dit licht zo fel, dat het volledig overheerst.

Het rode, hoge deel van het poollicht is gepolariseerd, het lagere groene en paarse licht niet. De polarisatierichting is loodrecht op de richting van het aardmagnetisch veld, dus west-oost gericht. Maximaal is de polarisatie als men loodrecht op het magnetisch zenit kijkt, dat bij ons op 67° hoogte in het noorden is. Theoretisch kan de polarisatiegraad van het rode licht dan wel 60% bedragen. De beste kans om dit bij ons waar te nemen is laag bij de noordelijke horizon, waar de polarisatiegraad ongeveer 55% moet zijn. Bij zeldzame poollichten die ook aan de zuidkant van de hemelkoepel verschijnen, is het gunstigste punt in het zuiden gelegen, op een hoogte van ruwweg 25° .

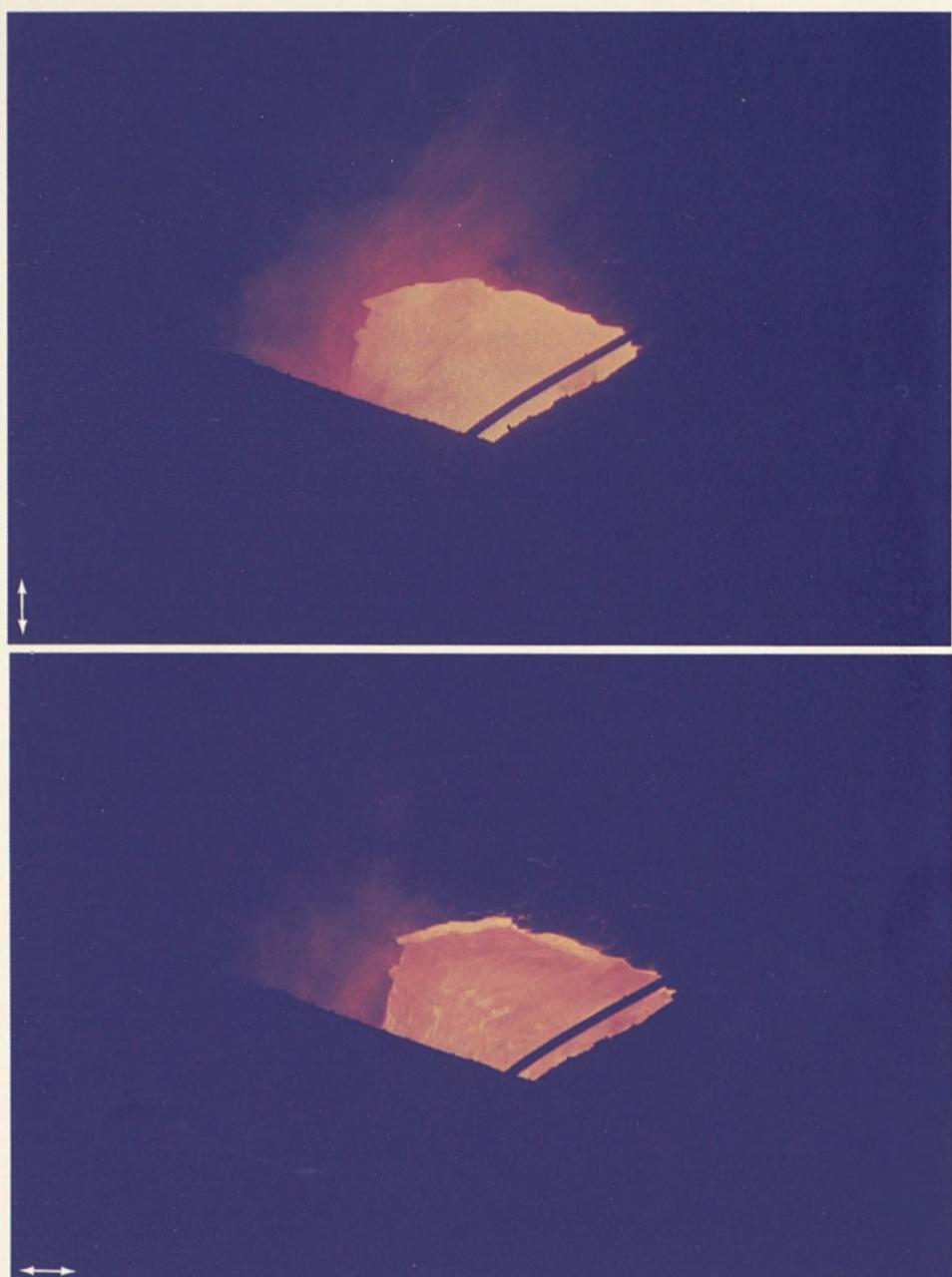
Deze polarisatie schijnt soms samen te hangen met het Zeeman-effect, dat optreedt ten gevolge van het aardmagnetisch veld (§ 97); lang niet iedere atomaire overgang is hier echter gevoelig voor. Hierdoor vertoont slechts het rode poollicht in behoorlijke mate polarisatie. Het poollicht is het enige verschijnsel van deze soort dat polarisatie vertoont in de natuur: andere elektrische effecten vertonen het niet merkbaar. Dit komt omdat andere ontladingen (bliksem e.d.) bij een veel hogere luchtdruk gebeuren en de invloed van magneetvelden te verwaarlozen is.

Het lijkt waarschijnlijk dat men met een filter kleurverschuivingen te zien zal krijgen bij poollicht: als men het filter zodanig houdt dat het rood maximaal uitgedoofd is, dan moet het (ongepolariseerde) groen relatief helderder worden. Het gele deel van poollicht (waar het rood en groen gemengd zijn) zal dus op en neer moeten schuiven al naar gelang de stand van het filter: men wijzigt op deze plaats de verhouding van het rood en groene licht. Bij een minimale doorlichting zal het onderste deel van het rood dus geelachtig, en het geel groenachtig moeten worden: bij een maximale doorlating is dit omgekeerd.

60 Het zodiakale licht, de Gegenschein en het ionosfeerlicht

Meer nog dan het poollicht zijn deze verschijnselen slechts zichtbaar bij een diepe, maanloze nacht, ver van het stadslicht. Het helderst van deze drie is het *zodiakale licht*, dat zich als een lichtgevende driehoek tegen de hemel aftekent op de plaats waar de zon zich beneden de horizon bevindt (plaat 67). De grootste helderheid heeft dit licht langs de ecliptica*; hierlangs wijst ook de punt van de driehoek. Dit betekent dat het verschijnsel het beste te zien is als de ecliptica steil op de horizon staat, dus in de lente na zonsonder-

* De ecliptica is de lijn langs de hemel waarlangs de zon zich in een jaar tijds beweegt.



Plaat 68-69 Stromend gloeiend ijzer. De gloed hiervan is verticaal gepolariseerd (§ 62). Met een horizontaal gericht filter (onder) worden golffjes beter zichtbaar. De zijkant van deze gloeiende stroom beweegt maar langzaam en hierop kan zich nog oxyde vormen; polarisatie is daar afwezig. (Foto's opgenomen dankzij welwillende medewerking van Hoogovens/Estel)

gang in het westen en in de herfst voor zonsopkomst in het oosten. Als de zon zo'n 20 tot 30 graden beneden de horizon staat zijn de waarnemingsomstandigheden het gunstigst, dit is ongeveer 3 uur voor zonsopkomst of na zonsondergang. Vanuit vliegtuigen kan men het zodiakale licht soms prachtig zien; de helderheid ervan is vergelijkbaar met die van de melkweg.

Het zodiakale licht is niet van aardse oorsprong; het is even goed zichtbaar vanaf de maan (plaat 67). Het ontstaat door strooing van zonlicht op de talloze minuscule stofdeeltjes in het zonnestelsel, die geconcentreerd zijn in een enorm, schijfsvormig gebied rond de zon. Deze schijf ligt in het vlak van de planetenbanen waardoor wij het strooilicht ervan zich langs de ecliptica zien uitstrekken.

Zoals men kan verwachten van strooilicht, is het zodiakale licht gepolariseerd, en wel tangentieel ten opzichte van de zon. In deze polarisatie onderscheidt het zich dus van het ongepolariseerde licht van de melkweg, dat immers tot stand komt door miljoenen zwakke sterren en geen strooilicht is. De polarisatiegraad van het zodiakale licht bedraagt maximaal ongeveer 20-25%. Deze waarden vindt men op zo'n 60° van de zon, maar dichterbij de zon of verder er van af is de polarisatie niet veel minder. Omdat de helderheid van het zodiakale licht snel groter wordt naarmate men dichter bij de zon kijkt (die zich natuurlijk onder de horizon bevindt) is de polarisatie daar ook beter te zien. Men kan deze polarisatie waarschijnlijk het beste waarnemen met de polariscoop.

Bij een zeer donkere winternacht kan men bemerken dat het zodiakale licht zich als een dunne lichtbrug langs de hele ecliptica voortzet, hierbij steeds lichtzwakker wordt en minder polarisatie vertoont. Nabij het punt recht tegenover de zon neemt de helderheid echter weer iets toe, dit is de *Gegenschein* (oppositielicht). Dit schijnsel is analoog aan de heiligschijn (§ 43): een toename van de helderheid bij de schaduw van de waarnemer. De *Gegenschein* is een uiterst zwak en moeilijk waarneembaar verschijnsel; zijn licht is evenals dat van de heiligschijn ongepolariseerd.

Tot slot vertoont de nachtelijke hemel ook licht dat niet van de sterren afkomstig is, maar vanaf de hoogste lagen van de atmosfeer. Dit licht wordt het *ionosfeerlicht* (aardlicht, airglow) genoemd; onder gunstige omstandigheden kan het nog vrij helder zijn. Het is ongepolariseerd.

61 Lichtende zee, hout, vuurvliegjes en dergelijke

Als de *zee* warm is, dus vooral in het najaar, zal men bij maanloze nacht bemerken dat deze licht uitzendt van een groenachtige kleur. Dit licht is niet afkomstig van het water zelf, maar van minuscule diertjes die oplichten als er zuurstof door het water wordt gemengd. Ze lichten maar kort op, maar omdat ze met zovele zijn is het schijnsel toch constant. Bij de *branding* wordt de lucht optimaal met het water vermengd, en is het licht dus het helderst. Maar ook midden op zee, waar geen branding is, ziet men lichtgevende plekken door het water gaan. Als men bij lichtende zee met de voet door het vochtige strand wrijft, ziet men de diertjes als vonkjes individueel oplichten.

Het licht van deze diertjes zelf is ongepolariseerd, maar omdat het door het wateroppervlak gebroken wordt voor het bij ons komt, verkrijgt het toch een verticale polarisatie (§ 79). Bij de branding is een regelmatig gevormd wateroppervlak echter afwezig zodat deze polarisatie niet optreedt, maar midden op zee is het licht wel gepolariseerd. De polarisatie is het sterkst als men schuin tegen het water kijkt, en kan dan theoretisch tot

zo'n 30% oplopen. Door de zwakte van het licht is het waarnemen van deze polarisatie niet eenvoudig.

Aardappelen, vis, rottend hout en bladeren kunnen bij vochtig weer eveneens een zwak licht uitzenden. Ook hier is de kleur groenachtig; juist zoals bij de zee is het chemiluminicentielicht, afkomstig van kleine diertjes of bacteriën. Bij hout zijn de draden van de honingzwam de eigenlijke lichtbron: een uil die uit een rottende, holle boom kruipit heeft deze draden in zijn vleugels en geeft dan eveneens licht; een spookachtig gezicht. In de tropen ziet men de vuurvliegjes als kleine lichtpuntjes rondvliegen; in Europa kan men de lichtgevende glimwormmpjes aantreffen. Het licht van al deze planten en dieren is van oorsprong niet gepolariseerd, en omdat het niet vervolgens door een glad oppervlak gebroken wordt (zoals bij het lichten van de zee) blijft polarisatie afwezig.

62 Gloeiende voorwerpen, vuur, vonken en bliksem

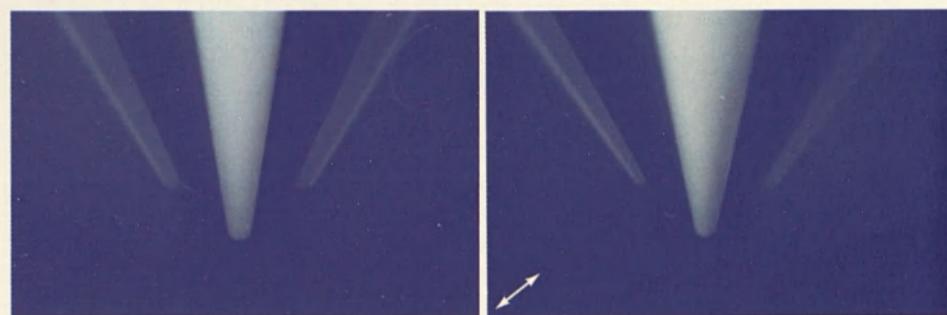
Vuur, vonken en bliksem (plaat 73) kan men rekenen tot de natuurlijke lichtbronnen, die een nachtelijke omgeving, zij het soms maar voor korte tijd, kunnen doen oplichten. Deze lichtbronnen zijn alle ongepolariseerd, evenals vonken van *vuurstenen* en het *Sint Elmusvuur*, dat men als een klein 'vlammetje' bij onweersachtig weer wel op uitsteeksels ziet verschijnen (plaat 74).

Anders is het met *gloeiende metalen*: als het oppervlak niet verontreinigd is, is hun gloed gepolariseerd, en wel lineair en verticaal gericht. Dit is slechts weinig bekend. Kijkt men loodrecht op het oppervlak, dan is de gloed ongepolariseerd, maar hoe schuiner men tegen het oppervlak aankijkt, des te sterker is de polarisatie (§ 80). Maximaal kan de polarisatiegraad wel 90% bedragen! Voorwaarde is wel, dat het metaaloppervlak, ook als het roodgloeiend is, schoon blijft. Dit is bij een edel metaal zoals zilver of platina het geval, zodat men hier deze polarisatie gemakkelijk kan zien. Ook bij een *stromend vloeibaar onedel metaal*, zoals staal of ijzer, blijft het oppervlak schoon en ook hier kan men de polarisatie dus zien; omdat zo'n vloeistof golfjes vertoont, verschilt de polarisatie van plaats tot plaats (plaat 68-69). Een andere manier om verontreiniging van het oppervlak van een onedel metaal te voorkomen is het in vacuüm te plaatsen (§ 64). Doet men zoiets niet, dan verdwijnt de polarisatie omdat het oppervlak bedekt wordt door oxydelaagjes. Men zal dan ook kunnen bemerken dat het licht van een zilverplaatje sterk gepolariseerd is, terwijl dat van het stalen pincet waarmee het vastgehouden wordt, geen spoor van deze polarisatie vertoont. Het is een bijna onwerkelijke gewaarwording dat men met een filter de gloed van een heetgestookt plaatje zilver bijna volledig kan doven, terwijl het hierbij toch zijn geelachtige kleur behoudt die bij zijn hoge temperatuur hoort.

De oorzaak van deze polarisatie is, dat de gloed niet van het oppervlak zelf afkomstig is, maar vanuit een minimale diepte in het metaal. Bij het naar buitentreden wordt dit licht, ook bij metalen, gebroken en dit leidt tot verticale polarisatie. Deze is echter veel sterker dan bij breking aan glas en dergelijke: ook *heetgestookt glas* vertoont een verticaal gepolariseerde gloed door breking, maar hier kan de polarisatiegraad nooit hoger dan 40% zijn.

Men kan verwachten, dat ook de gloed van *stromend lava* of hete gesteenten, bijvoorbeeld bij vulkaanuitbarstingen, enige verticale polarisatie vertoont, mits het oppervlak van de gloeiende materie glad is. Het is echter te betwijfelen of men zich onder deze omstandigheden altijd de rust zal gunnen om dit soort waarnemingen te verrichten.

Tenslotte blijkt een heetgestookt dichroït kristal als *toermalijn* eveneens een gepolari-



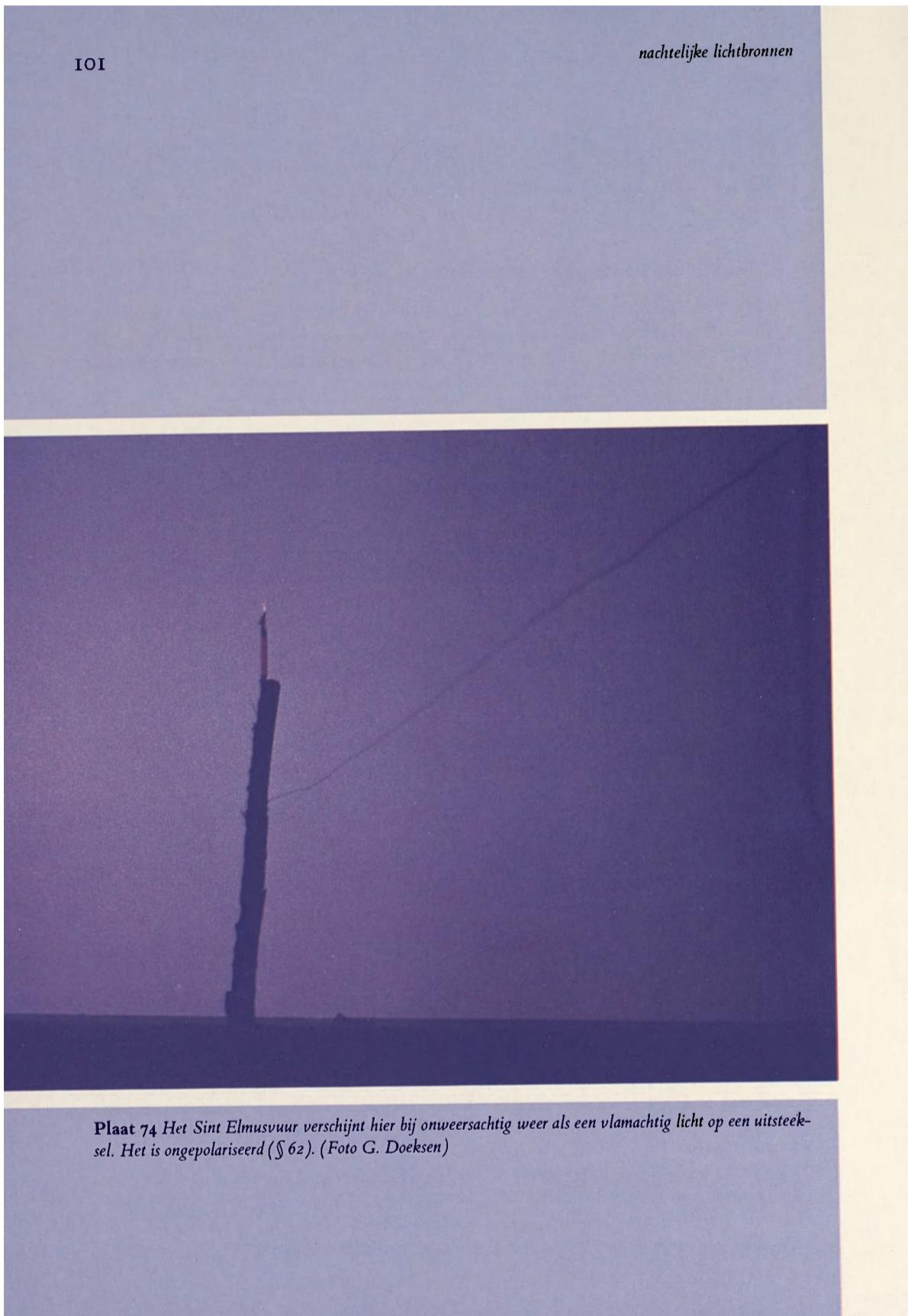
Plaat 70-71 het licht van een TL-buis is gepolariseerd. Links zonder, rechts met filter. Er verschijnt dan een donkere band over de buis (§ 64).



Plaat 72 Een circulair filter laat zijn eigen gespiegelde licht niet door, maar wel dat van het tegengestelde filter ernaast (§ 88, 91). Zulke filters worden wel voor lichtbronnen geplaatst om schitteringen weg te nemen (§ 64).

Plaat 73 Bliksems behoren tot de weinige nachtelijke lichtbronnen die in staat zijn het stadslicht te overstralen. Ze vertonen geen polarisatie (§ 62).





Plaat 74 Het Sint Elmusvuur verschijnt hier bij onweersachtig weer als een vlamachtig licht op een uitsteeksel. Het is ongepolariseerd (§ 62). (Foto G. Doeksen)

seerde gloed uit te stralen, zelfs als men loodrecht op zijn oppervlak kijkt. De polarisatie is dan loodrecht op die, welke men verkrijgt bij doorvallend licht (§ 84). Hoe sterker het dichroisme, des te hoger is de polarisatiegraad van het uitgezonden licht; voor toermalijn bedraagt deze maximaal ongeveer 40%.

63 Lichtbronnen en licht in een nachtelijke stad

Bij een nachtelijke wandeling door een verlichte stad loont het zeker de moeite een polarisatiefilter mee te nemen: er is veel gepolariseerd licht om ons heen. Van de belangrijkste effecten geven wij een beknopte beschrijving; veel van de weerkaatsingseffecten van het kunstlicht zijn natuurlijk precies gelijk aan die van het zonlicht overdag, en zijn in de vorige hoofdstukken behandeld.

De *verlichte ramen* van de huizen zenden gepolariseerd licht uit; deze polarisatie is verticaal gericht ten opzichte van het glasoppervlak, dus doorgaans horizontaal ten opzichte van de grond. Deze polarisatie ontstaat door breking aan het vensterglas: hoe schuiner men tegen de ruiten kijkt, des te sterker is de polarisatie. Kijkt men recht door de ruit, dan is er natuurlijk geen polarisatie. *Straatlantaarns* kunnen ook gepolariseerd zijn als men er schuin tegen aan kijkt, mits het glas- of plastic omhulsel ervan vlak is. De *weerkaatsing* van de straatlantaarns tegen het wegdek of de huizen is eveneens gepolariseerd; hier heeft men te doen met ruwe oppervlakken en is de polarisatie dus tangentieel gericht. Zie ook § 46. Recht onder zo'n lantaarn is de helderheid van het weerkaatste licht het grootst. Hier komt de tangentiële richting van de polarisatie overeen met horizontaal ten opzichte van de grond; de polarisatie van dit licht is sterk. Priemt er zich een heldere lichtbundel van een schijnwerper of van een projector door het duister, dan is ook deze tangentieel gepolariseerd: deze bundel is immers slechts zichtbaar doordat er lichtstrooiling tegen de luchtdelten optreedt. Verwijdert men zich van een stad, dan blijft nog lang de *gloed* van het stadslicht zichtbaar. Zoals al het strooilicht, is het ook hier tangentieel gepolariseerd; deze polarisatie is vooral bij helder weer duidelijk waarneembaar.

Bij verlichting door kunstlicht 's nachts zien wij in principe dezelfde polarisatieverschijnselen van het weerkaatste of gestrooiide licht om ons heen optreden die we overdag, bij zonlicht, kunnen waarnemen. Het enige echte verschil is nu, dat de lichtbron veel dichter bij staat en er vaak sprake is van een groot aantal verschillende lichtbronnen.

64 Kunstmatige lichtbronnen zoals lampen, horlogeplaten, TL- en TV-buizen

Het licht van *TL-buizen*, *TV-schermen*, *lampen* en andere kunstmatige lichtbronnen is lineair gepolariseerd, en wel verticaal ten opzichte van het oppervlak van hun buitenwand. De reden is hier niet dat het licht in deze voorwerpen zelf al gepolariseerd is (de ontlading in een TL-buis, een natriumlamp of kwiklamp is zelfs volkomen ongepolariseerd), maar dat dit licht door de brekingen aan het omhullende glas (of plastic) gepolariseerd wordt. Omdat hier van twee brekingen sprake is, kan de polarisatie vrij aanzienlijk zijn, en bij glas bijv. maximaal 60% bedragen (§ 79). Dit geldt echter alleen als men zeer schuin tegen het glas kijkt, en het licht dus maximaal gebroken is. Bij het overgrote deel van zo'n lichtbron kijkt men veel rechter tegen het glas aan, en is het licht veel minder sterk gepolariseerd. Omdat de vorm van zo'n bron bovendien vrij rond is, is het licht van deze bronnen als *geheel* praktisch ongepolariseerd. De polarisatie van die delen van zo'n lichtbron waar het licht wél sterke polarisatie vertoont laat zich makkelijk

vaststellen: bij een TL-buis ziet men bijv. met een polarisatiefilter een donkere streep verschijnen, die zich over de buis verplaatst als men het filter draait (plaat 70-71). Bij TV-schermen blijkt de polarisatie als men scheef tegen het toestel aankijkt. Gloeilampen vertonen aan hun rand een duidelijke polarisatie; de plaats waar het licht maximaal met een filter uitgedoofd wordt draait mee als men het filter draait.

Sommige gloeilampen zijn niet van matglas, maar van doorzichtig glas gemaakt. Hier ziet men dus de gloeidraad zitten, die door de elektrische stroom tot een hoge temperatuur wordt verhit en hierbij rood of geelgloeiend wordt. Als deze gloeidraad (die meestal van het metaal wolfaam gemaakt is) niet te dun is, dan kan men in principe de polarisatie van dit metaal zelf waarnemen, zoals beschreven in § 62. Weliswaar is wolfaam geen edel metal, maar in de gesloten lamp blijft het vaak toch vrij schoon en zendt het dus licht uit, dat verticaal gepolariseerd is ten opzichte van zijn oppervlak; deze polarisatie kan in principe zeer sterk zijn. Omdat een gloeidraad echter doorgaans een ingewikkelde spiraalstructuur heeft, is het waarnemen ervan veel minder eenvoudig dan het lijkt. Bovendien is nu ook hier de polarisatie van het totale licht bijna niet waarneembaar: ieder stukje draad geeft licht met een andere polarisatierichting af, zodat alles elkaar bijna opheft.

De rode *lichtende cijfertjes* van een digitaal horloge of een elektronische teller blijken volledig lineair gepolariseerd te zijn. Hier wordt de polarisatie echter veroorzaakt omdat zich voor de cijfertjes een circulair filter bevindt om hinderlijke lichtreflecties tegen de plaat te onderdrukken (plaat 72). Nu bestaat zo'n filter uit een combinatie van een lineair filter en een plaatje dat lineair licht in circulair licht omzet. Aangezien dit laatste plaatje zich aan de kant van de lichtbron bevindt, kijken wij tegen het lineair filter aan en zien dus gepolariseerd licht (§ 7, 88). Zonder dit filter zou het rode licht van de cijfertjes ongepolariseerd zijn. De groene lichtende *wijzerplaat* van een gewoon horloge zendt eveneens ongepolariseerd licht uit; hier ontstaat alleen wat polarisatie door de brekingen aan het horlogeglas, juist zoals dat bij lampen het geval is.

Koninklijk Nederlands
Meteorologisch Instituut
Bibliotheek,
Postbus 201,
3730 AE DE BILT.
Nederland.

Blz. 104, 105

Plaat 75 Poollicht, hier gezien vanaf de Zuidpool.
Het lage, groene poollicht dat hier is afgebeeld is
ongepolariseerd; het hogere, rode poollicht vertoont
een lineaire polarisatie (§ 59). (Foto C. W. van
Vliet)





Kleurverschijnselen bij mineralen in gepolariseerd licht

65 Inleiding

Dubbelbrekende en optisch actieve materialen (§ 92) vertonen kleurverschijnselen als het invallend licht gepolariseerd is en men bovendien het uittredend licht met een filter bekijkt. Is één van deze voorwaarden niet aanwezig, dan is zo'n materiaal vaak glasachtig transparant en kleurloos, zodat het uiterlijk wel zeer verandert als men de boven genoemde omstandigheden kiest (zie ook plaat 61-63 op blz. 85). Deze kleuren zien wij o.a. verschijnen in autoruiten en ijsbloemen (§ 52, 53), die dubbelbreking, en dus chromatische polarisatie (§ 93) vertonen. Veel fraaier nog zijn de effecten die optreden als men en vlak stukje mineraal tussen twee filters houdt: door de regelmatige opbouw hiervan zijn de kleuren nu gerangschikt in prachtige, geordende figuren! Er bestaan bijna geen mineralen die dit soort kleurverschijnselen niet vertonen, omdat praktisch alle kristalklassen (behalve de kubische) dubbelbrekend zijn.

In tegenstelling tot de polarisatieeffecten die in de vorige hoofdstukken behandeld zijn, zal men voor het waarnemen van dit soort kleureffecten in mineralen maatregelen moeten treffen: men moet de beschikking hebben over een dun plaatje van het mineraal en zorgen dat aan de bovengenoemde voorwaarden voldaan is. Hierdoor vallen dit soort waarnemingen eerder onder de noemer eenvoudige experimenten dan onder polarisatie-effecten in de natuur. De moeite die men hiervoor moet doen wordt echter ruimschoots vergoed door de schitterende regelmatige figuren en kleureffecten die dan te voorschijn komen, en waarvan op plaat 76-84 voorbeelden gegeven zijn die in de volgende paragrafen nader besproken worden.

De effecten en figuren die bij mineralen in gepolariseerd licht optreden houden nauw verband met de opbouw van deze kristallen. Eénassige mineralen (§ 83) vertonen anderssoortige figuren dan tweedimensionale; is het materiaal bovendien optisch actief (§ 95), dan wordt daardoor de vorm van de figuren beïnvloed. Hiernaast zijn er een aantal mineralen die pleochroïet (dichroïet of trichroïet, § 84) zijn, hetgeen weer tot aparte lichtverschijnselen leidt. Hoe de figuren zich precies manifesteren hangt bovendien af van de gebruikte filters waartussen het mineraal gehouden wordt: hier kan men het best onderscheid maken tussen de combinatie lineair-lineair, lineair-circulair en circulair-circulair. De figuren bij gekruiste en evenwijdige filters zijn echter in alle gevallen complementair, d.w.z. dat zwart door wit, en b.v. rood door groen vervangen wordt, maar verder de vorm van de figuur behouden blijft.

Het is slechts weinig bekend hoe gemakkelijk het is deze figuren met het blote oog waar te nemen: in de meeste natuurkundeboeken staat onder het hoofdstuk 'interferentieeffec-

ten in convergent gepolariseerd licht' een vrij ingewikkelde opstelling getekend waarmee waarnemingen verricht kunnen worden, en is hierbij een foto opgenomen van zo'n regelmatig figuur, opgenomen in monochromatisch licht. Wat er meestal niet bij wordt verteld, is dat men dezezelfde figuren ook al te zien krijgt als men simpelweg een vlak stukje mineraal tussen polarisatiefilters vlak bij het blote oog houdt, en dat deze figuren bovenbien prachtig gekleurd zijn als men in plaats van monochromatisch licht, wit licht gebruikt! De figuren zijn het fraaist als men ongeveer in de richting van de optische as(sen) kijkt (§ 83, 94), maar ook in andere richtingen is het waarnemen de moeite waard. Bij een aantal mineralen ziet men de figuren al duidelijk als men door het ongeschonden kristal heenkijkt, maar bij andere zal men een vlak plaatje van het betreffende mineraal moeten zien te bemachtigen om ze te zien.

Hoewel ieder mineraal tot specifieke figuren aanleiding geeft, kan men toch duidelijk systematiek in de optredende mogelijkheden ontdekken: alle éénassige mineralen bijvoorbeeld, vormen gelijksoortige figuren. In dit hoofdstuk geven wij in het kort een beschrijving van de figuren die men zoal kan verwachten, dit aan de hand van enkele mineralen die representatief kunnen worden beschouwd voor een bepaalde klasse verschijnselen, zonder verder op de verklaring van deze figuren in te gaan. Deze is summier gegeven in § 92-95. De precieze verklaring van een aantal optredende effecten is trouwens vaak nogal ingewikkeld en valt buiten het kader van dit boek, maar men behoeft deze werkelijk niet te kennen om geboeid te raken door de verschijnselen die bij mineralen in gepolariseerd licht te voorschijn komen.

Het loont tenslotte de moeite zelf wat te experimenteren en bijvoorbeeld plaatjes van verschillende mineralen op elkaar te leggen om te kijken wat er dan met de interferentiefiguren gebeurt: vooral als één van de mineralen optisch actief is (zoals kwarts) verschijnen er verrassende effecten die men niet snel in de leerboekjes terug zal vinden.

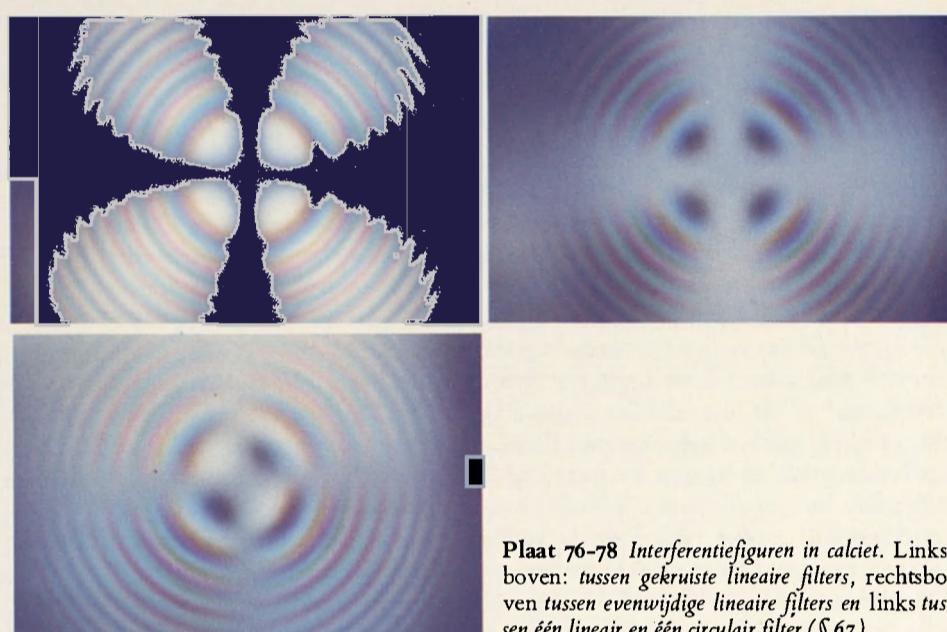
66 Wijze van waarnemen

Hiervoor heeft men een plaatje van het mineraal nodig; de optimale dikte ervan bedraagt enkele millimeters. De fraaiste figuren zien wij als het plaatje zodanig is dat wij in de richting van de optische as(sen) kunnen kijken. Bij kwarts bijv. betekent dit dat het plaatje loodrecht op het zeshoekig gedeelte moet zijn afgesneden. Wil men het kristal intact laten, dan vormen de pyramidevormige uiteinden ervan vaak een handicap. Dit kan men ondervangen door het kristal in een glasje water te plaatsen: de breking van het licht aan de kristalvlakken is dan minder. Omdat de vorm van de kleurige figuren niet zo sterk afhangt van de lengte van het kristal, blijven ze dan redelijk intact.

De regelmatige figuren worden zichtbaar als men het plaatje tussen polarisatiefilters houdt en *vlak* bij het oog houdt. Als het voorste filter lineair is, dan kan men dat natuurlijk ook weglaten als er direct naar gepolariseerd licht, zoals van een weerkaatsing of van de blauwe lucht wordt gekeken. Sommige kristallen zijn opgebouwd uit grote 'deelkristallen' (vertweelingd) en dan ziet men soms de figuren al zonder filters: reflecties in zulke kristallen nemen dan de rol over van de polarisatiefilters.

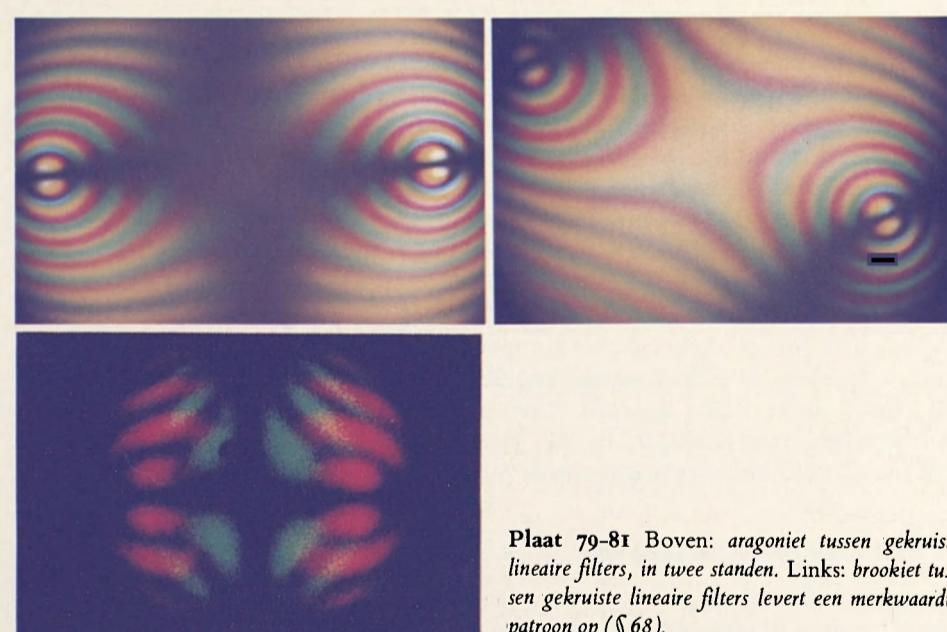
67 Eenassige mineralen als calciet

Als men een dergelijk kristal tussen twee lineaire filters bekijkt, ziet men in de richting van de optische as concentrische, gekleurde ringen verschijnen. Deze ringen zijn door-



Plaat 76-78 Interferentiefiguren in calciet. Linksboven: tussen gekruiste lineaire filters, rechtsboven tussen evenwijdige lineaire filters en links tussen één lineair en één circulair filter (§ 67).

sneden door twee, recht op elkaar staande assen: de *isogyren*. Bij gekruiste filters zijn deze zwart, bij evenwijdige wit (fig. 46 en plaat 76-77). Eén isogyre staat in de richting van het trillingsvlak van het invallend licht, de andere loodrecht erop. Door het verschijnen van deze isogyren verraadt het gepolariseerde licht eigenlijk meteen dat het niet naar alle kanten trilt en dus 'asymmetrisch' is. Precies in de richting van de optische as is dubbel-



Plaat 79-81 Boven: aragoniet tussen gekruiste lineaire filters, in twee standen. Links: brookiet tussen gekruiste lineaire filters levert een merkwaardig patroon op (§ 68).

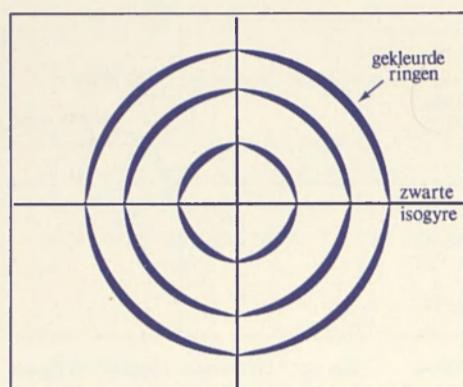


fig. 46 Eénassig mineraal tussen gekruiste lineaire filters.

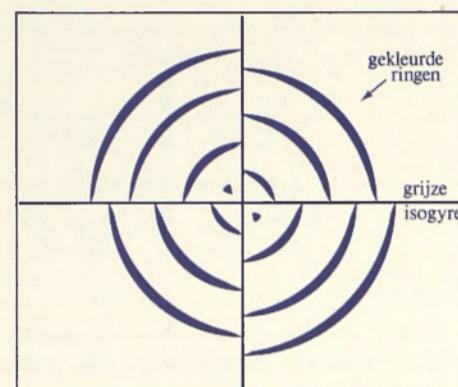


fig. 47 Eénassig mineraal tussen een lineair en een circulair filter.

breking afwezig, en laten de filters al dan niet licht door zoals ze dat ook zonder het mineraal ertussen zouden doen.

Vervangt men nu één van de filters door een circulair filter, dan vervagen de isoglyren. Men zal nu bemerken dat de ringen vervormd zijn: in de verschillende kwadranten die door de isoglyren afgescheiden worden hebben de ringen afwisselend een andere straal. Vergelijken met de vorige situatie hebben de cirkels in het eerste en derde kwadrant (het 'NO en ZW') een kleinere straal en in het tweede en vierde (het 'NW en ZO') een grotere straal (of omgekeerd). De gekleurde 'ringen' lijken nu eerder op rechthoeken (plaat 78 en fig. 47).

Plaats men nu het mineraal tussen twee circulaire filters, dan zien wij weer de concentrische ringen verschijnen, maar zijn de isoglyren afwezig. Inderdaad wordt dit licht niet meer gekarakteriseerd door een trillingsrichting, maar door een draaizin.

Eénassigheid treedt op bij mineralen die tot de tetragonale, hexagonale of trigonale kristalstelsels behoren. Dit zijn de klassen die na de kubische (waar dubbelbreking afwezig is) de meeste symmetrie-elementen bezitten. Kristallen met een nog lagere symmetrie zijn niet éénassig, maar tweearassig – dit geldt dus voor de rhombische, monokliene en trikliene mineralen.

68 Tweearassige mineralen als aragoniet

De verschijnselen die in dit soort kristallen optreden zijn niet zo symmetrisch als die in de éénassige, zoals ook hun opbouw minder symmetrisch is. In plaats van concentrische ringen verschijnt er nu een krakelingachtige figuur; de twee centra ervan vormen de optische assen. De afstand tussen deze assen varieert van mineraal tot mineraal. Gemaks-halve beperken wij ons nu tot het geval van gekruiste, lineaire filters (evenwijdige filters geven weer het complementaire beeld). In dit geval zien wij, als de trillingsrichting van één van de filters in de verbindingslijn van de optische assen staat, de isoglyren weer als een donker kruis verschijnen, waarbij de ene isoglyre de verbindingslijn tussen de assen vormt en de andere loodrecht erop, precies tussen de assen instaat (fig. 48 en plaat 79). Zelfs als men maar één van de assen te zien krijgt (omdat bijvoorbeeld de afstand tussen deze te groot is), herkent men meteen de tweearassigheid omdat de ringen nu door één,

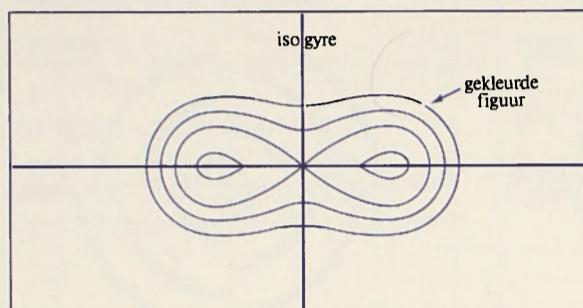


fig. 48 Tweeassig mineraal tussen gekruiste lineaire filters.

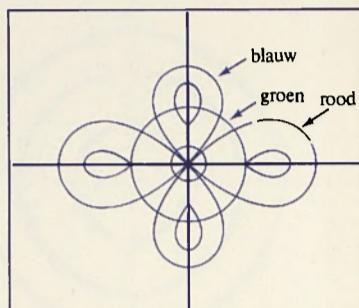


fig. 49 Bij brookiet verschilt het figuur van kleur tot kleur.

in plaats van twee balken doorsneden worden. Draait men het kristal tussen de filters, dan blijft de gekleurde krakelingachtige figuur intact, maar veranderen de isogrypen in hyperbolen die elkaar dus niet meer snijden. Ze blijven echter altijd door de optische assen gaan (plaat 80).

Vervangt men één lineair filter door een circulair filter, dan vervagen de isogrypen weer en treedt er een verschuiving van de gekleurde figuren op, analoog aan die bij éénassige kristallen. Tussen twee circulaire filters zijn de isogrypen weer afwezig en verschijnt slechts de oorspronkelijk genoemde krakelingachtige figuur.

De rhombische, monokline en triklinee mineralen zijn tweearassig en leveren dus de bovenstaande verschijnselen op. Het blijkt hierbij, dat de precieze wijze van kleuring van de figuren afhangt van de kristalklasse, en men deze dus in principe hieraan kan herkennen. Een éénassig kristal kan overigens kunstmatig tweearassig gemaakt worden door het uitwendig onder druk te zetten.

Tenslotte mag het volgende niet onvermeld blijven. De mate van tweearassigheid (de afstand tussen de optische assen) hangt, behalve van de uitwendige druk en de temperatuur van het kristal, ook nog af van de kleur van het licht. Interessant is in dit opzicht het rhombische mineraal *brookiet*, dat zich voor groen licht toevallig precies gedraagt als een éénassig kristal, en voor rood en blauw tweearassig is. Voor deze twee laatste kleuren staan de 'krakelingen' echter precies loodrecht op elkaar (fig. 49). In wit licht ziet men dan een merkwaardig gevormd figuur verschijnen als resultaat van de menging van al deze krakelingachtige figuren van verschillende kleur (plaat 81). Helaas is brookiet een zeer zeldzaam mineraal, zodat men om dit te zien een mineralogisch instituut zal moeten bezoeken. *Gips* is een tweede mineraal dat deze eigenschap vertoont, zij het pas bij hogere temperaturen (ongeveer 90° C). Het is echter niet gemakkelijk om natuurlijk gips in de juiste richting te klieven, daar het juist in een andere richting zeer makkelijk splijtbaar is. Bovendien moet men uitkijken dat het niet te hoog verhit wordt, omdat het boven de 120° C overgaat in het mineraal anhydriet.

69 Optische activiteit in suikeroplossingen en mineralen als kwarts

In zijn meest zuivere vorm kan men optische activiteit (het roteren van het polarisatievlak, fig. 50) waarnemen bij geconcentreerde oplossingen van suiker en andere organische stoffen. Men ziet dan kleuren verschijnen, als een dergelijk stof tussen lineaire

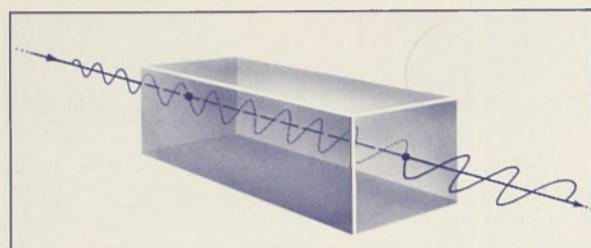


fig. 50 Bij doorgang door een optisch actieve stof verandert het trillingsvlak van lineair licht geleidelijk van richting.

filters gehouden wordt. De kleur die te voorschijn komt hangt af van de onderlinge stand van de filters en van de concentratie van de oplossing. Ze wijkt enigszins af van de kleuren die bij dubbelbreking te zien zijn. Wat ook de onderlinge stand is van de filters, er komt altijd licht van een bepaalde kleur door en wit licht kan men dus nooit volledig uitdoven. Dit komt omdat de rotatie van het polarisatievlak sterk van de kleur afhangt (§ 95). Vervangt men echter één of beide filters door een circulair filter, dan verdwijnt het effect, omdat optische rotatie (in tegenstelling tot chromatische polarisatie bij dubbelbreking) nooit lineair licht in circulair kan omzetten. Gekruiste circulaire filters laten dus, ook als er zich een actieve stof tussen bevindt, geen licht door.

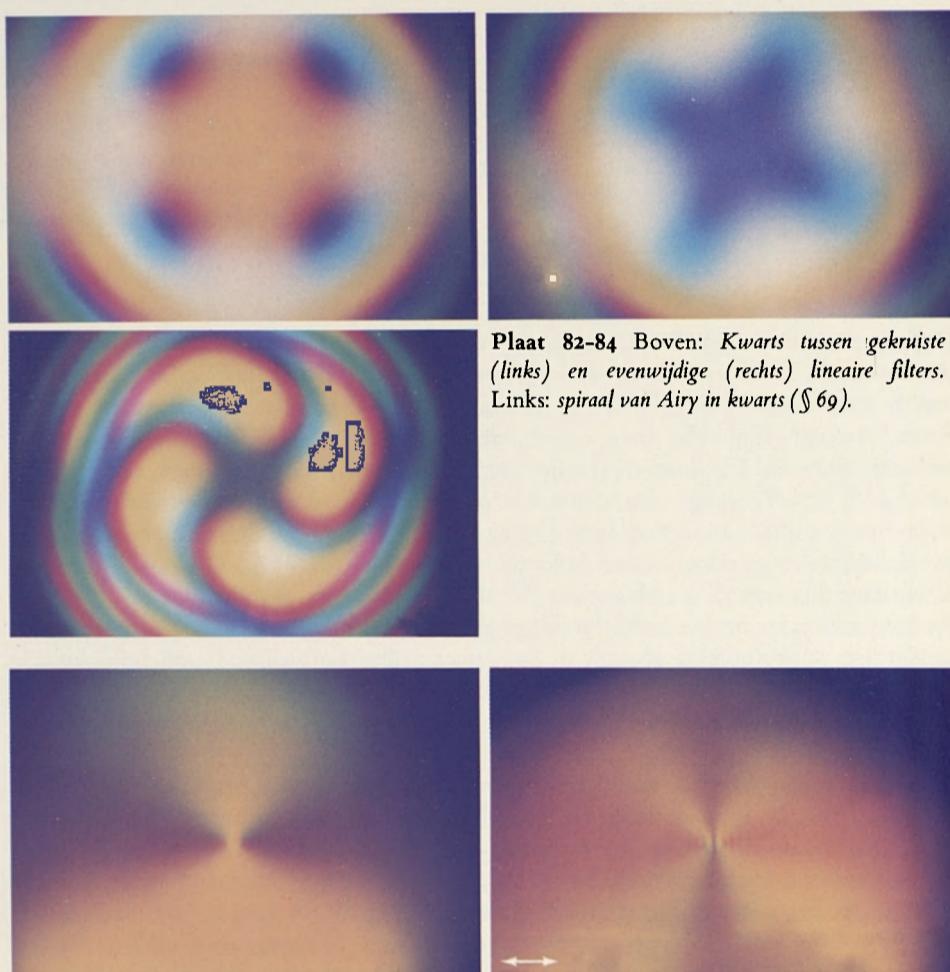
Actieve mineralen uit het kubische stelsel geven hetzelfde te zien als suikeroplossingen, omdat hier dubbelbreking afwezig is. Er bestaan echter nauwelijks doorzichtige kristallen in deze klassen. In feite zijn er in de natuur in het algemeen maar weinig mineralen die optische activiteit vertonen. Eén van deze mineralen komt echter in enorme hoeveelheden op aarde voor: het trigonale mineraal *kwarts*.

Kwarts is, behalve optisch actief, een éénassig mineraal. Het samenspel van dubbelbreking en optische activiteit leidt tot opmerkelijke interferentiefiguren in gepolariseerd licht, speciaal in de richting van de optische as. Tussen lineaire filters ziet wij, dat de concentrische, gekleurde ringen die verschijnen enigszins vervormd zijn tot vierkantige figuren. In het centrum verschijnt een gekleurd gebied als gevolg van de optische activiteit. Bij evenwijdige filters is dit gebied klaverbladvormig, met 'bladen' die een hoek van 45° met het trillingsvlak van het licht maken (plaat 82-83). In dit gebied ziet men altijd een kleur, en is het nooit wit of zwart, zoals bij niet-actieve kristallen. Verder van de as af wordt de optische activiteit steeds meer overheerst door de dubbelbreking en gaat het figuur dus meer en meer over in dat van gewone éénassige kristallen.

Vervanging van één van de lineaire filters door een circulair filter geeft een grote verandering in het patroon. De cirkels veranderen nu in een spiraal, die zich tot in het centrum voortzet. Ook in de richting van de optische as ziet wij een spiraal met twee 'vleugels'. Vervangt men ook het tweede filter door een circulair filter, dan ziet men eenzelfde patroon als bij inactieve kristallen: gekleurde concentrische ringen zonder isogyren, en de invloed van de optische activiteit is afwezig.

Kwarts kan zowel links- als rechtsdraaiend zijn. Een merkwaardig patroon ontstaat als men twee even dikke kwartsplaatjes op elkaar legt die tegengesteld actief zijn, en wel zodanig dat ze beide loodrecht op de optische as gesneden zijn. In de richting van de optische as is optische activiteit nu afwezig; tussen gekruiste lineaire filters is het daar dus donker. Er verschijnen nu ook weer zwarte isogyren, maar deze hebben nu een *spiraalvorm!* Naar zijn ontdekker heet deze figuur de spiraal van Airy (plaat 84).

Als men kwarts smelt en weer laat stollen heeft het zijn optische activiteit verloren. De



Plaat 82-84 Boven: Kwarts tussen gekruiste (links) en evenwijdige (rechts) lineaire filters. Links: spiraal van Airy in kwarts (§ 69).

Plaat 85-86 Links: bundels van Brewster in epidoot (§ 70). Deze lijken sterk op de bundels van Haidinger (§ 7). Rechts: Met een lineair filter in de juiste stand verschijnen in epidoot de idiofanische ringen (§ 70).

activiteit is bij deze stof het gevolg van een spiraalvormige opbouw in het mineraal, die bij smelting verloren gaat. Anders is het bij een stof als suiker, waar de activiteit het gevolg is van een spiraalvormige opbouw van de atomen in de *moleculen*; suiker is dus zowel in oplossing als in kristalvorm optisch actief. In dit laatste geval is dit echter moeilijk te zien, omdat suikerkristallen tweedimensionaal zijn en de optische activiteit overheerst wordt door sterke dubbelbrekingseffecten. Wil men toch zien wat er gebeurt bij een tweedimensionaal optisch actief mineraal, dan kan men het beste een kwartskristal nemen en dat door middel van uitwendige spanningen kunstmatig tweedimensionaal maken.

Het loont tenslotte de moeite om een kwartsplaatje op een calciet of ander plaatje te leggen, dan wel een calcietplaatje in een suikeroplossing te bestuderen, en zo te kijken wat deze combinaties voor figuren opleveren. Vaak ziet men dan gekleurde spiralen bij de optische as verschijnen.

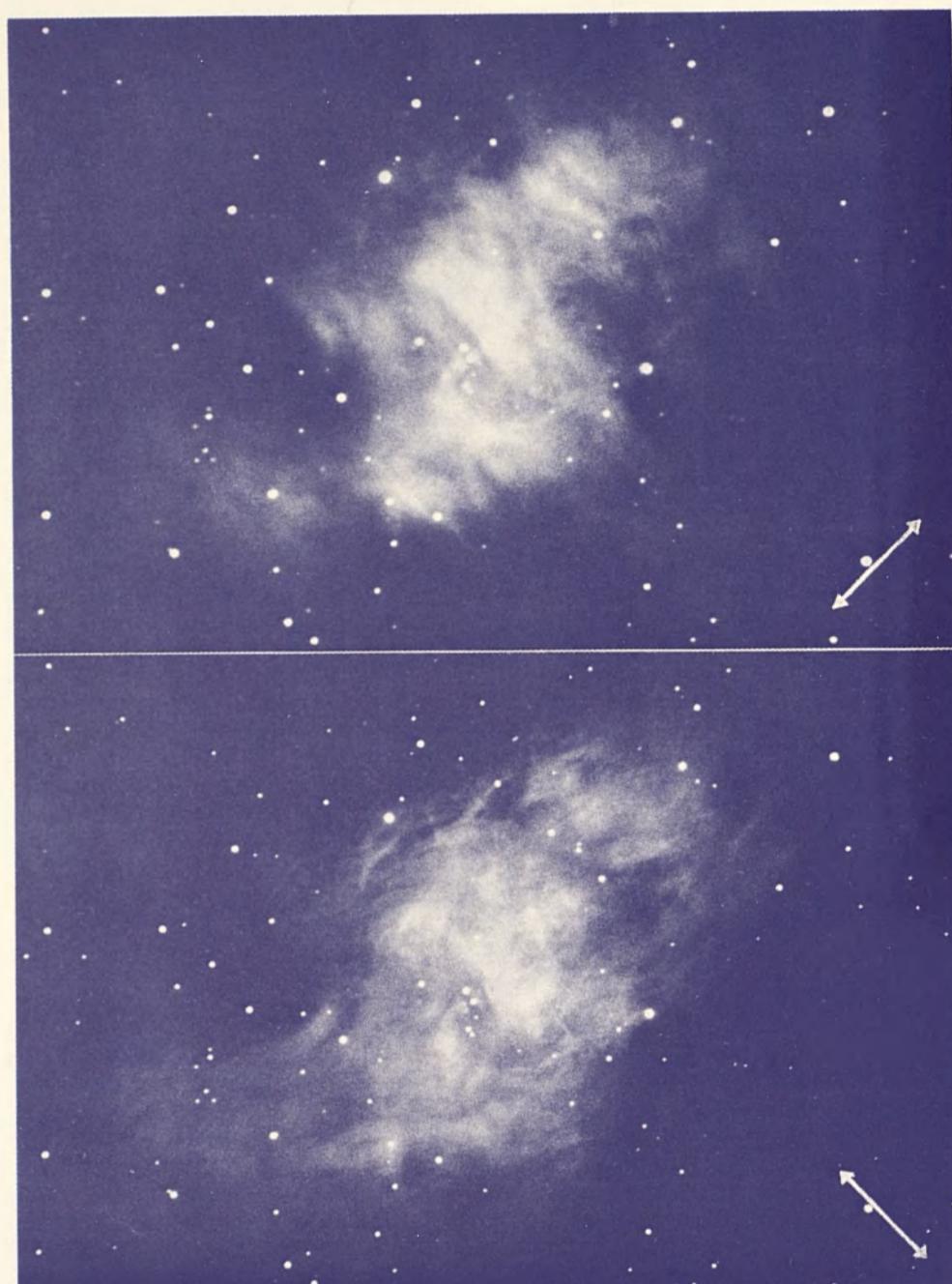
70 Pleochroite mineralen als glaucofaan, toermalijn en epidoot. Bundels van Brewster en idiofanische ringen

Een pleochroite stof heeft de eigenschap dat het verschillende kleuren vertoont in verschillende trillingsrichtingen. Zo'n stof is dus altijd gekleurd. Is hij éénassig, dan spreekt men van dichroisme; bij tweeeassigheid van trichroisme (§ 84). Een voorbeeld van dichroisme is een polarisatiefilter, dat in de éne richting meestal helder en groenachtig, en in de andere zeer donker, diepblauw is. Dit laatste komt dus pas te voorschijn als men het filter kruist met een ander. Een aantal mineralen vertoont hetzelfde, een voorbeeld is toermalijn. Hier zijn de kleuren ook groen en diepblauw, of groenblauw-bruin, afhankelijk van de variëteit. Het sterkst treedt het op loodrecht op de optische as; in de richting van deze as is het afwezig. Bij een trichroït mineraal zijn er niet twee, maar drie kleuren die op kunnen treden. Welke men ziet hangt dan, behalve van de stand van het filter, ook af van welke zijde men het mineraal beziet. Bij glaucofaan bijvoorbeeld ziet men aan de ene zijde van het kristal de combinatie paars-geel, bij een ander vlak geelblauw en bij een derde blauw-paars. Ook zonder filter merkt men al op dat de verschillende zijden een andere kleur vertonen. Cordiëriet is een ander voorbeeld van een trichroït mineraal waar de drie kleuren sterk verschillen (zie ook § 12).

De verschijnselen die men bij pleochroite mineralen in gepolariseerd licht te zien krijgt wijken geheel af van die bij gewone dubbelbrekende kristallen. Sommige ervan ziet men al met slechts één filter voor het mineraal of zelfs bij afwezigheid van filters in natuurlijk licht, omdat het materiaal zelf al als filter werkt. Bekijkt men het éénassige mineraal toermalijn in de richting van zijn optische as, dan verschijnt er zonder filters een donkere vlek in het midden van het gezichtsveld. Houdt men er een lineair filter voor, dan ziet men, loodrecht op de trillingsrichting hiervan, een paar donkere bundels verschijnen. Een tweede filter erachter verandert nogmaals het beeld: loodrecht op de oorspronkelijke bundels zien wij nu andere bundels verschijnen, met hier omheen concentrische interferentieringen: de *idiofanische ringen*.

Bij trichroïte mineralen ziet men het eerstgenoemde bundelpaar al zonder polarisator verschijnen! Deze worden de *bundels van Brewster* genoemd. Het mineraal epidoot vertoont ze wel het fraaist (plaat 85), maar ook in cordiëriet zijn ze goed te zien. Eén filter, voor of achter het mineraal gehouden, is al voldoende om de idiofanische ringen zichtbaar te maken (plaat 86).

In zijn algemeenheid zijn de verschijnselen bij pleochroite mineralen lang niet zo kleurrijk als die bij gewone dubbelbrekende mineralen. Het feit echter, dat ze zo ervan verschillen en helemaal niet parallel er aan lopen maakt de pleochroite mineralen tot een interessant waarnemingsobject.



Plaat 87-88 De Krabnevel in de Stier is gepolariseerd; met een polarisatiefilter verandert zijn vorm (§ 58).
Deze foto is opgenomen met een zeer grote kijker; met een kleinere kijker ziet men de nevel slechts als een diffuse vlek. (Foto W. Baade, Mt. Palomar)

Deel III

Het ontstaan van gepolariseerd licht in de natuur

Inleiding

71 Algemeen overzicht

Er zijn in de natuur slechts weinig lichtbronnen die gepolariseerd licht uitzenden. Het licht van onze belangrijkste bron, de zon, is ongepolariseerd. Niettemin is de hoeveelheid gepolariseerd licht om ons heen aanzienlijk. *Indirect* is dit licht ook wel van de zon afkomstig, maar het bereikt ons oog via een omweg nadat het bijvoorbeeld door een voorwerp in onze richting is gekaatst. Het blijkt nu dat hierbij het oorspronkelijk ongepolariseerde zonlicht vaak wordt omgezet in geheel of gedeeltelijk gepolariseerd licht. Op een enkele uitzondering na is dit licht dan *lineair* gepolariseerd. *Circulair* licht ontstaat – afgezien van de enkele uitzondering – pas als dit lineaire licht eerst nog op een tweede voorwerp valt en ons oog dan pas bereikt. Lang niet alle voorwerpen hebben echter het vermogen om lineair licht om te zetten in circulair licht, en bovendien hangt de mate waarin dit gebeurt vaak sterk af van de wijze waarop dit tweede voorwerp door het lineaire licht wordt getroffen. Hierdoor is de hoeveelheid circulair licht om ons heen vele malen geringer dan de hoeveelheid lineair licht.

In de meeste gevallen gebeurt het omzetten van ongepolariseerd licht in gepolariseerd licht, of het omzetten van gepolariseerd licht in een andere vorm van polarisatie voor alle kleuren op dezelfde wijze. Dit betekent, dat men met een filter al het licht gelijkmataig kan uitdoven. Als echter de mate waarin het licht wordt omgezet van kleur tot kleur verschilt, treden er kleurverschijnselen op als men het licht met een filter bekijkt, en ziet men bijvoorbeeld wit licht veranderen in gekleurd licht. Ook dit effect blijkt soms in de natuur te zien te zijn.

Om de volgorde van belangrijkheid aan te houden voor de vorming van gepolariseerd licht in de natuur beschrijven wij eerst de verschillende processen waarbij ongepolariseerd licht wordt omgezet in gepolariseerd licht. Hierna behandelen wij de wijze waarop het karakter van gepolariseerd licht kan veranderen, en de sterke kleureffecten die hierbij soms optreden. Tenslotte noemen wij nog de enkele mogelijkheden waarbij gepolariseerd licht direct ontstaat.

Het ontstaan van gepolariseerd licht uit ongepolariseerd licht

72 Polarisatie door weerkaatsing en door strooiling. Algemene beschouwing

Dit zijn verreweg de belangrijkste ontstaanswijzen van gepolariseerd licht in de natuur. Ongepolariseerd licht bestaat uit lichtgolven die afwisselend in alle richtingen trillen. Treft dit licht nu een voorwerp, dan zullen de elektronen die zich in dit voorwerp bevinden al deze trillingen overnemen. Dit voorwerp kan van alles zijn: een metaal, een ondoorzichtig of doorzichtig materiaal, een minuscuul stofdeeltje, een los atoom of zelfs een los elektron. Omdat lichtgolven alleen loodrecht op hun voortplantingsrichting trillen, zijn de overgenomen trillingen van de elektronen eveneens loodrecht hierop, dus alle in een vlak loodrecht op de lichtbundel. Kijkt men nu loodrecht op deze bundel, dan 'zien' wij de elektronen alle in één lijn trillen (zie ook § 5, fig. 10). Het licht, dat in deze richting wordt uitgezonden trilt dus eveneens in de richting van deze lijn loodrecht op de bundel, en is dus volledig, lineair gepolariseerd, en wel *tangentiell*. In een andere richting kijken wij schuin op het vlak waarin de elektronen trillen, en zien ook trillingen met een andere richting. Hier zien wij dus slechts gedeeltelijk gepolariseerd licht, maar de polarisatierichting blijft tangentiell.

Kleine deeltjes, zoals stofdeeltjes, atomen en elektronen zenden het licht naar alle richtingen uit. Men spreekt dan van *strooiling*. Bij grote gladde oppervlakken, zoals glas, metaal etc. werken de trillingen van de elektronen zodanig samen dat het licht maar in één richting wordt uitgezonden. Dan spreekt men van *weerkaatsing*. De tangentiële polarisatie t.o.v. de lichtbron correspondeert dan met een *horizontale* polarisatie t.o.v. het weerkaatsend vlak. Bij weerkaatsing dringt overigens ook meestal een gering of een groot gedeelte van het licht in het materiaal, dit heet *breking*. Het is overigens duidelijk dat een bolletje van bijv. glas wèl het licht in alle richtingen kaatst; hier kan men ook van *verstrooiling* spreken. In dit opzicht is de grens tussen strooiling en weerkaatsing niet scherp bepaald.

Bij strooiling aan kleine deeltjes en weerkaatsingen aan een oppervlak is het licht, dat ongeveer 90° van richting is veranderd, het sterkst gepolariseerd. Men noemt de hoek waarover deze richtingsverandering heeft plaatsgevonden de *strooihoek* Θ , ongeacht of er nu sprake is geweest van strooiling aan kleine deeltjes op weerkaatsing of breking aan een oppervlak. Deze hoek geeft dus de *hoekafstand* aan tussen de lichtbron en de plaats waar een bepaald gedeelte van het gestrooide (weerkaatste) licht terecht is gekomen. Het verband tussen de *invalshoek* i en de *strooihoek* Θ bij weerkaatsing aan een glad oppervlak is geschatst in fig. 51; hieruit zien wij bijvoorbeeld dat de hoekafstand tussen de zon en spiegelbeeld op rustig water 90° bedraagt bij een zonshoogte van 45° , en 60° bij een zonshoogte van 30° . Weerkaatsing en strooiling leveren karakteristieke kleur- en polarisatieeffecten op, die vooral afhangen van de grootte van de strooende deeltjes en de optische eigenschappen van de weerkaatsende stof. Nauw met weerkaatsingseffecten hangen de *brekingseffecten* samen, waarbij een gedeelte van het licht in het materiaal treedt en hierbij gepolariseerd wordt. In feite zijn bijna alle effecten die tot het omzetten van ongepolariseerd licht in gepolariseerd licht leiden, en die in dit hoofdstuk ter sprake komen, terug te voeren op

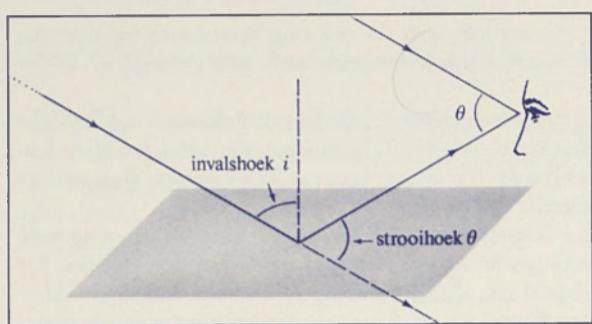


fig. 51 De strooihoek θ geeft de hoekafstand tussen gestrooid licht en de oorspronkelijke lichtbron aan. Bij weerkaatsing geldt $\theta = 180 - 2i$, waarbij i de invalshoek is.

strooien of weerkaatsing/breking, het laatste al dan niet gepaard gaande met absorptie bij zijn weg door het materiaal. Dit zijn dezelfde processen die verantwoordelijk zijn voor bijna al het licht in de natuur overdag, daar wij om ons heen praktisch alleen maar één of meerdere keren gestrooid, weerkaatst of gebroken zonlicht zien.

73 Strooien aan kleine en grote deeltjes

Onder kleine deeltjes verstaan wij meestal deeltjes die kleiner zijn dan de golflengte van het licht, welke zo'n 0,0006 mm bedraagt. Dit zijn bijvoorbeeld de gasmoleculen in onze dampkring, minuscuile stofdeeltjes en de (nog veel kleinere) elektronen in de wereldruimte. Strooien aan dit soort deeltjes levert onder 90° in principe volledig lineair gepolariseerd licht op; kijkt men naar strooilicht dichter bij de lichtbron of verder ervan af (dus met een kleinere resp. grotere strooihoek) dan neemt de polarisatiegraad af. Licht dat precies teruggestrooid of voorwaarts wordt gestrooid ($\theta = 180^\circ$ resp. 0°) vertoont geen polarisatie. Circulaire polarisatie is bij deze strooien afwezig, onder welke hoek men ook kijkt. De mate van polarisatie bij strooien is voor alle kleuren hetzelfde, mits de deeltjes maar klein zijn. Losse elektronen zenden hierbij wit licht als wit licht uit; men spreekt van *Thomsonstrooien*. Dit licht ziet men in de nabijheid van de zon tijdens een totale zonsverduistering als coronalicht (§ 19). Atomen en moleculen strooien daarentegen blauw licht effectiever dan rood licht, omdat bij blauw de golflengte van het licht kleiner is en dus nog het dichtst in de buurt van de afmetingen van deze deeltjes komt. Hetzelfde geldt voor zeer kleine stof- of rookdeeltjes; deze strooien heet *Rayleighstrooien*. Het strooilicht bij Rayleighstrooien is dus kenmerkend blauw van kleur, zoals wij dit kennen van bijvoorbeeld de blauwe hemel (§ 12). De polarisatie van dit licht is echter weer voor alle kleuren gelijk en vertoont hetzelfde beeld als bij de Thomsonstrooien. Met een polarisatiefilter kan men dus het blauwe hemellicht, vooral op ongeveer 90° van de zon flink afzwakken, maar het behoudt hierbij in principe zijn blauwe kleur. Het blijkt hierbij dat de polarisatiegraad op 90° van de zon geen 100% bedraagt, maar maximaal ongeveer 75% is. Dit is het gevolg van een aantal verstoorende effecten (meervoudige strooien, grondreflecties, de aanwezigheid van stof en moleculaire anisotropieën die er voor zorgen dat onze atmosfeer een iets afwijkend strooipatroon vertoont van ideale Rayleighstrooien, al komt het er wel erg dichtbij).

Bij strooien op kleine deeltjes hangt het strooipatroon niet of nauwelijks af van de samenstelling of vorm van de deeltjes. De mate van strooien wordt gegeven door de wet van Rayleigh, en is evenredig met λ^{-4} , waarbij λ de golflengte van het licht is. Grottere deeltjes verstrooien het licht sterker omdat het licht meer 'merkt' van hun aanwezigheid, en hun strooilicht is minder blauw. Het wordt bij toename van de afmetingen al snel wit en overheerst het blauwe licht van kleinere deeltjes in de atmosfeer dan volledig, zoals men kan zien als er wolkenvorming in de atmosfeer op gaat treden. De polarisatie van het strooilicht blijft bij grotere deeltjes echter ongeveer hetzelfde beeld vertonen. Een heiige lucht (§ 13), komeetstaarten (§ 58), lichtende nachtwolken (§ 25), het zodiakale licht (§ 60), fijne rook (§ 22) en het strooilicht onder water (§ 56) vertonen allemaal

polarisatie ten gevolge van strooien. Verder kan men dit ook nog waarnemen bij licht dat verstrooid wordt door een fles water waarbij enkele druppels melk zijn gevoegd en in het laboratorium bij kritische opalescentie.

Bij strooien aan deeltjes met afmetingen die vergelijkbaar zijn met de golflengte van het licht treden gecompliceerdere polarisatieeffecten op, waarbij de polarisatie van kleur tot kleur kan verschillen. Wellicht zijn de kleurverschijnselen die bij parelmoerwolken optreden als men deze met een filter bekijkt, hierop terug te voeren (§ 25).

Zijn de deeltjes tenslotte veel groter dan de golflengte van het licht, dan hangt de strooien sterk af van de samenstelling, vorm, oriëntatie en de optische eigenschappen van deze deeltjes; het maakt bovendien veel uit of zo'n deeltje al dan niet doorzichtig is. Om een volledig beeld te krijgen van de strooiings- en polarisatieeffecten die dan kunnen optreden moet men alle weerkaatsingen, brekingen en buigingen van het licht beschouwen die tot strooien in een bepaalde richting aanleiding kunnen geven. Zulke strooien treedt bijvoorbeeld op bij regen- of wolken-druppels, bij ijskristallen en andere deeltjes, die dus alle tot sterk verschillende en karakteristieke strooipatronen aanleiding geven. Regenbogen (§ 27) en halo's (§ 33) zijn voorbeelden van kenmerkende strooingseffecten aan zulke grote deeltjes, waarbij men soms meer geneigd is van collectieve weerkaatsings- en brekingseffecten dan van verstrooiing te spreken. Maar zoals gezegd is de grens hiertussen bij grote deeltjes niet scherp te trekken.

74 Uitwendige weerkaatsing op niet-metalen

Weerkaatsing op gladde, niet metallische voorwerpen zet ongepolariseerd licht om in horizontaal, lineair gepolariseerd licht; deze lineaire polarisatie kan in gunstige gevallen volledig zijn. Deze omzetting gebeurt bij weerkaatsing op glas, wateroppervlakken, ijs en dergelijke, maar ook op glanzend hout, gladde steen, gras, kortom op alle niet-metallische voorwerpen die een *glans* vertonen. Omdat bij weerkaatsing, in tegenstelling tot bij strooien aan kleine deeltjes, ook breking van het licht optreedt (waarover later), gebeurt de grootste polarisatie niet bij een strooihoek van 90° , maar bij een iets kleinere. De hoek waar dit gebeurt wordt gegeven door de *wet van Brewster* en hangt alleen af van de brekingsindex van het materiaal, n . Voor volledige polarisatie geldt dan $\tan i = n$, ofwel $\tan \frac{1}{2}\theta = i/n$. Omdat bij uitwendige weerkaatsing altijd n groter dan één is, volgt hier al meteen uit dat de strooihoek waar het licht 100% gepolariseerd is, kleiner moet zijn dan 90° . Bij volledige polarisatie staat de weerkaatste lichtstraal niet loodrecht op de invallende lichtbundel, maar op de *gebroken* bundel – uit dit gegeven kan men onmiddellijk de wet van Brewster uit de brekingswet van Snellius afleiden. Omdat de brekingsindex maar zeer weinig varieert van kleur tot kleur, is ook de polarisatiegraad van het licht niet merkbaar kleurafhankelijk. Het blijkt dat als de brekingsindex tot één nadert, het polarisatielijntje exact hetzelfde is als bij strooien aan kleine deeltjes; voor een andere brekingsindex verschilt deze enigszins. Behalve bij de *Brewster hoek* (dit is de invalshoek voor volledige polarisatie) is de polarisatie gedeeltelijk; bij loodrechte of scherende weerkaatsing is het gereflecteerde licht ongepolariseerd. Het weerkaatste licht is overigens doorgaans veel zwakker dan het doorgelaten (gebroken) licht.

Er is in principe geen enkel verschil tussen weerkaatsing op een doorzichtige stof als glas of water, en weerkaatsing op een glanzende ondoorzichtige stof als steen, huid, etc. In beide gevallen kan men dus met een polarisatiefilter de glans geheel of gedeeltelijk uitdoven. Hierop berust de werking van *polarisatiezonnebrillen*. Wat dan overblijft is de zuivere kleur van het materiaal; glas en dergelijke worden met zo'n filter volkomen doorzichtig. Men zal bemerken dat de glans van een voorwerp altijd wit is, en nooit de eigen kleur van het materiaal aanneemt. Neemt men met een filter de glans van de voorwerpen om ons heen weg, dan wordt de wereld dus kleurrijker (zie § 44 e.v.).

De polarisatierichting is, zoals gezegd, *horizontaal*. Als licht dus door willekeurig georiënteerde

vlakjes wordt weerkaatst, of door bolletjes, dan is het aldus verstrooide licht *tangentieel* gepolariseerd, juist zoals bij strooing aan kleine deeltjes. Dit licht zien wij bijvoorbeeld bij wolken, die bestaan uit waterdruppeltjes of uit ijskristalletjes die door de atmosfeer dwarrelen. De polarisatie van wolkenlicht vertoont dus in principe ongeveer hetzelfde patroon als de blauwe lucht (§ 20).

75 Inwendige weerkaatsing op niet-metalen. Totale reflectie

Hierbij gelden dezelfde wetten als bij uitwendige weerkaatsing. Het enige verschil is dat de brekingsindex hier kleiner is dan 1. Als deze bij uitwendige reflectie, bijvoorbeeld bij lucht-glas $3/2$ is, dan is hij bij glas-lucht $2/3$. Dit is begrijpelijk als men bedenkt dat de brekingsindex de verhouding van de lichtsnelheid boven en onder het weerkaatsend vlak voorstelt. Omdat de brekingsindex bij inwendige weerkaatsing dus altijd kleiner is dan één, treedt volledige polarisatie nu voor een grotere strooihoek dan 90° op. Het is hierbij echter niet gezegd dat bijv. een atmosferisch verschijnsel waarbij inwendige weerkaatsing een rol speelt, zijn grootste polarisatie inderdaad op ongeveer 90° van de zon bereikt. Dit komt omdat hier de lichtstraal eerst in het voorwerp moet treden voor het inwendig weerkaatst kan worden, en bij dit intreden door breking al van richting verandert. Hetzelfde gebeurt nogmaals bij het uittreden. Hierdoor wordt een inwendige weerkaatsing vaak over een geheel andere hoek gezien (gestrooid) en verschijnt dus op een geheel andere plaats aan de hemel (fig. 52). Dit treedt in de natuur bijv. op bij de

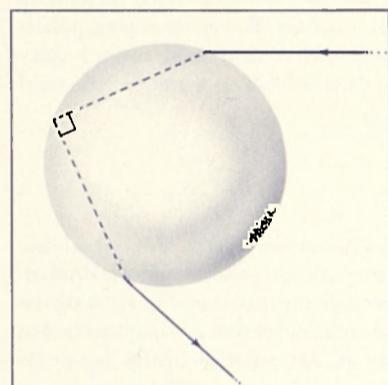


fig. 52 Bij inwendige kaatsing over bijv. 90° kan de strooihoek veel groter zijn tengevolge van brekingen. Hierdoor ziet men zulk licht veel verder van de zon af verschijnen.

regenboog, die op ongeveer 140° van de zon verschijnt en door inwendige weerkaatsing in de regendruppels bijna geheel gepolariseerd is (§ 27). Juist zoals bij uitwendige weerkaatsing is de polarisatie weer horizontaal gericht bij inwendige weerkaatsing; aan de richting van de polarisatie kan men dus nooit zien of er sprake van in- of uitwendige weerkaatsing is geweest. Polarisatie door inwendige weerkaatsing treedt in de natuur, behalve bij regenbooglicht, ook op bij o.a. wolkenlicht en sommige halo's (§ 20 en § 39).

Als de weerkaatsing erg scherend gebeurt, dan treedt er bij inwendige weerkaatsing *totale reflectie* op. Dit wil zeggen dat er geen licht meer uittreedt, en al het invallende licht weerkaatst wordt. Dat gebeurt als $\sin i = (\cos \frac{1}{2}\theta) > n$; dit is alleen mogelijk als $n < 1$, dus bij inwendige weerkaatsing. Totaal gereflecteerd licht is erg fel; het totaal reflecterend oppervlak ziet er als een metaal uit, zoals wij bijvoorbeeld bij een glazen asbak kunnen zien. Omdat nu al het invallend licht weerkaatst wordt (zowel met een horizontale als een verticale polarisatierichting) en er dus geen licht na breking uit het oppervlak verdwijnt, treedt er 'noodgedwongen' geen polarisatie bij zo'n weerkaatsing op. Totale reflectie treedt in de natuur o.a. op bij de vorming van sommige halo's (§ 39), en bij hockige, doorzichtige voorwerpen in de natuur die het zonlicht dan zeer sterk weerkaatsen (§ 51).

76 Metallische reflectie

Ook bij weerkaatsing van ongepolariseerd licht op een metaal wordt het licht sterk, horizontaal gepolariseerd, al wordt in de literatuur vaak het tegenovergestelde beweerd. Onder metallische oppervlakken kunnen wij *alle* voorwerpen met een metaalglaas rekenen, dus niet alleen de metalen zelf. Kenmerkend voor zulke materialen is dat hun weerkaatsend vermogen erg groot is, en dat ze hoogstens in zeer dunne lagen nog doorzichtig zijn: het weinige licht dat het materiaal indringt wordt buitengewoon sterk geabsorbeerd. Voor het verdere verloop van dit verhaal is het van belang er op te wijzen dat hier het doorgaande licht geheel tegengesteld van karakter is aan het weerkaatsende licht, in *alle opzichten*. Goud heeft bijv. een gele glans, en laat deze kleur dus het minst door, zodat een dun laagje goud een groenachtig licht doorlaat. Hetzelfde ziet men bij metaalachttige zonnebrilglazen. Dit betekent ook dat als er bij reflectie gepolariseerd licht is ontstaan, het doorgelaten licht niet alleen tegengesteld van kleur, maar ook van polarisatie is. Bij metallische reflectie treedt horizontale polarisatie op, dus het doorgelaten licht moet verticaal gepolariseerd zijn. Voor het begrijpen van polarisatieeffecten door breking is dit van belang (§ 79, 80, 82). De polarisatie van het licht bij metallische reflectie is zeer aanzienlijk, maar toch niet zo volledig als bij weerkaatsing op niet-metalen. Bij één bepaalde invalshoek van het licht is de polarisatie maximaal; deze treedt op bij een behoorlijk scherende invalsrichting. Deze hoek, die vergelijkbaar is met de Brewster hoek bij niet-metalen, hangt nauw samen met de verderop te behandelen *hoofdinvalshoek* (§ 91).

Hoe donkerder het metaaloppervlak, des te meer (verticaal) licht kan in het materiaal dringen, en dus des te sterker is de horizontale polarisatie van het weerkaatsende licht. Een zilveren plaat polariseert het invalrend licht dus minder dan roestvrij staal. Deze negatieve samenhang tussen helderheid en polarisatie treedt ook op bij weerkaatsing op ruwe oppervlakken en wordt daar de regel van Umov genoemd (§ 77).

77 Weerkaatsing op ruwe oppervlakken

Hier ontstaat tangentiële polarisatie, zij het vaak aanzienlijk minder sterk dan bij gladde oppervlakken. Het licht heeft hier vaak meerdere weerkaatsingen ondergaan op bijv. verschillende zandkorreltjes vóór het oog bereikt wordt, en hierbij neemt de polarisatie af. Dit komt omdat het gepolariseerde licht dat na één reflectie is ontstaan, een tweede oppervlak zodanig kan treffen dat het ten opzichte hiervan bijv. verticaal gepolariseerd is. Na reflectie hierop neemt de polarisatie weer af omdat er horizontaal licht wordt toegevoegd. Kenmerkend van zeer ruwe oppervlakken is, dat zij geen 'glaas' bezitten, die (§ 75) bestaat uit gepolariseerd licht. Vele voorwerpen in de natuur zijn ruw, zoals sneeuw, zand, steen, enzovoort. Een voorwerp zoals gras, huid en dergelijke bezit weliswaar een (gepolariseerde) glans die de wet van reflectie volgt, maar in andere richtingen dan waar deze glans verschijnt zien wij de eigen kleur van het voorwerp (§ 45-47). Deze eigen kleur is te zien doordat het voorwerp toch ruw is, en de polarisatie hiervan gedraagt zich zoals die van andere ruwe oppervlakken. Voor ruwe oppervlakken geldt de *regel van Umov*: hoe donkerder het voorwerp, des te sterker is zijn polarisatie. Licht van sneeuw, wit zand of papier is dus in veel geringere mate gepolariseerd dan dat van zwart zand, asfalt of bakstenen. De maximale polarisatiegraad P is volgens deze regel precies omgekeerd evenredig met het albedo (weerkaatsend vermogen) van het materiaal.

Dit Umov effect kan men als volgt begrijpen. Licht, dat één enkele maal door de oneffenheden van een ruw oppervlak is weerkaatst, heeft zoals gezegd nog een behoorlijke polarisatiegraad. Bij een groter aantal weerkaatsingen verdwijnt echter de polarisatie. Bij een donker oppervlak zien wij het licht dat vele weerkaatsingen tegen oppervlakte-oneffenheden heeft ondergaan niet of nauwelijks, omdat het door al die weerkaatsingen te veel aan intensiteit verliest. Hierdoor zien wij alleen het licht dat wel een behoorlijke polarisatie vertoont. Bij een helder weerkaatsend oppervlak zien wij daarentegen meervoudig gekaast licht wel (hierdoor is het oppervlak dan

ook zo helder), maar het grootste deel van dit licht heeft zijn polarisatie verloren. Het netto effect is dat in dit laatste geval de polarisatie van al het weerkaatste licht bij elkaar opgeteld minder is. Een ruw oppervlak zendt invallend licht naar alle kanten uit. Het blijkt niettemin dat het meeste licht toch wordt gekaast in de richting waar wij de glans zouden verwachten. Bij een alzijdige belichting van zo'n oppervlak, zoals wij dat bijv. zien bij een zandvlakte onder een zwaar bewolkte lucht, blijkt hierdoor de polarisatierichting toch horizontaal te zijn ten opzichte van het oppervlak. Bij verlichting door een sterke lichtbron, zoals de zon, is de polarisatie tangentieel gericht ten opzichte van de lichtbron en maakt dus in het algemeen een hoek met het oppervlak. In feite kan men weerkaatsing aan een ruw oppervlak het beste zien als een strooiling aan hele kleine oneffenheidjes op het oppervlak. De richting van dit oppervlak is dan onbelangrijk geworden, zodat wij een tangentiële polarisatie kunnen verwachten, die dan ook optreedt. Het enige verschil met strooiling van losse deeltjes in de atmosfeer is, dat bij ruwe oppervlakken meervoudig gekaast licht een belangrijker rol speelt.

78 Gepolariseerd licht door strooiling en weerkaatsing: conclusie

Uit de vorige paragrafen blijkt, dat praktisch al het ongepolariseerde licht dat een reflectie of een strooiling heeft ondergaan gepolariseerd wordt. Deze polarisatie is lineair, en tangentieel (of horizontaal) gericht. Alleen bij totale reflectie, of bij licht dat voorwaarts of terug gestrooid (weerkaatst) wordt is de polarisatie afwezig; verder vertonen de helderste voorwerpen de minste polarisatie. Lichtverschijnselen in de richting van de zon of zijn tegenpunt vertonen dus doorgaans nauwelijks polarisatie, terwijl er op zo'n 90° van de zon meestal de sterkste polarisatie te zien is. Nu is verreweg het meeste licht dat wij overdag te zien krijgen verstrooid of weerkaatst zonlicht. Hierdoor overheert in de natuur de *tangentiële* polarisatie over de *radiële* polarisatie, en de *horizontale* polarisatie over de *verticale* polarisatie.

79 Breking aan niet-metallen

Licht dat een voorwerp treft wordt in twee stralen gesplitst: één weerkaatste en één doorgelaten bundel. Bij niet-metalen is de intensiteit van de weerkaatste bundel doorgaans maar gering: het grootste deel van het licht wordt gebroken en gaat het materiaal in. Toch is deze doorgelaten bundel iets zwakker dan de invallende bundel, omdat een deel hiervan weerkaatst is. Deze weerkaatste bundel is echter horizontaal gepolariseerd. Dit betekent dat de doorgelaten bundel *verticaal* gepolariseerd moet zijn: als men de weerkaatste en de doorgelaten bundel samen zou stellen, dan zou men het oorspronkelijke, ongepolariseerde licht weer terug moeten krijgen (fig. 53). Omdat de intensiteit van het weerkaatste licht meestal klein is, is ook maar een betrekkelijk

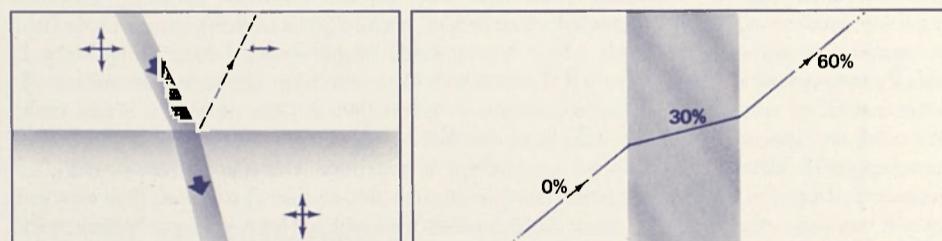
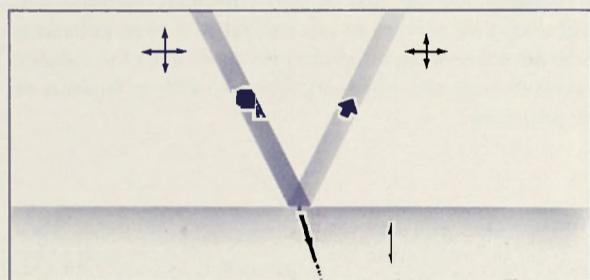


fig. 53 Breking aan een niet-metaal. Een klein deel van het invallend licht wordt als horizontaal gepolariseerd licht uitwendig weerkaatst. Het overblijvende licht dringt het materiaal in, en is dus verticaal gepolariseerd.

fig. 54 Bij één breking is de maximale polarisatiegraad 30%, bij twee brekingen ongeveer 60%.

gering deel van het horizontaal gepolariseerde licht verdwenen, en dus de polarisatie van het gebroken licht vrij gering. De polarisatie hiervan is maximaal bij een scherende inval of uitval van het licht, dus als de lichtstraal een maximale breking heeft ondergaan. Deze polarisatie neemt snel af bij een minder scherende inval of uitval. Licht dat één maal door glas of water is gebroken heeft een maximale polarisatiegraad van ongeveer 30%. Wordt licht echter meerdere keren achtereenvolgens gebroken, dan is de polarisatie groter: bij twee brekingen door een glasplaat bedraagt de polarisatiegraad maximaal al 60% (fig. 54), en bij meerdere brekingen komt hij al snel boven de 90%. Een stapeltje glasplaatjes kan dus als een uitstekende polarisator dienen (§ 7). Door dit brekingseffect is het licht dat men ziet als men bijv. schuin tegen een TV-scherm kijkt, behoorlijk sterk gepolariseerd (§ 64). Kijkt men minder schuin hiertegen, dan wordt de polarisatie snel minder. In principe zal ook de lichtgevende zee dit moeten vertonen, maar het licht is hier doorgaans zo zwak dat het bijzonder moeilijk is de polarisatie ervan vast te stellen (§ 61). Behalve deze voorbeelden is natuurlijk ook gebroken zonlicht gepolariseerd; dit ziet men als men door een ruit heen kijkt (§ 51), of als een duiker van onder water naar de zon toekijkt (§ 56). Evenzo is het licht dat 's nachts door de ramen van huizen naar buiten komt gepolariseerd (§ 63). Vindt de breking plaats aan willekeurig georiënteerde vlakken, dan resulteert dit in een radiële polarisatie ten opzichte van de lichtbron. In de natuur kunnen wij dit waarnemen bij sommige halo's die door brekingen zijn ontstaan, zoals de circumzenitale boog (§ 37).

Polarisatie door breking kan men alleen verwachten als de brekingsindex abrupt van waarde verandert. Gaat deze verandering geleidelijk, zoals bij luchtspiegelingen (§ 46), of bij het oppervlak van de zon het geval is (§ 58), dan resulteert dit *niet* in polarisatie.



80 Breking aan metalen: emissiepolarisatie

Bij breking door *metalen* geldt dezelfde redenering als bij breking aan niet-metallen, met dien verstande dat hier juist het weerkaatste licht zeer intens is, maar niet geheel gepolariseerd. Dit betekent dat het weinige licht dat het metaal intreedt, sterk verticaal gepolariseerd moet zijn (fig. 55). Dit blijkt inderdaad het geval te zijn; ook hier is de polarisatie het sterkst bij een scherende inval van de inkomende straal (dus weer bij een maximale breking). Normaal gesproken kunnen wij dit licht nauwelijks waarnemen, omdat zijn intensiteit gering is en dit licht bovendien sterk geabsorbeerd wordt. Alleen bij zeer dunne laagjes is metaal doorzichtig. Maar als metaal rood gloeiend is, dan kunnen wij wel zulk gebroken licht zien! Dit rode licht ontstaat nl. *in* het metaal, en wordt bij de uitval gebroken en gepolariseerd. Deze polarisatie is zeer sterk, en kan bij een scherende uitval al snel meer dan 80% bedragen. Een voorwaarde is wel dat het metaaloppervlak schoon is: oxydelaagjes verknocen de polarisatie. Het effect is daarom wel goed te zien bij zilver of platina, en bij stromende vloeibare metalen als ijzer (§ 62). Vast ijzer vertoont het niet vanwege oxydevorming, tenzij het in vacuüm geplaatst is. Het is aardig te bedenken dat een hoge polarisatiegraad zoals die bij gloeiende metalen optreedt, bij gewone breking pas zou gebeuren als de brekingsindex 4 bedroeg, terwijl de hoogste brekingsindex die optreedt bij doorzichtige materialen slechts 3 is (voor rutiel). Bij glas kan men een dergelijke sterke polarisatie pas na 5 brekingen verkrijgen. Het gepolariseerd licht van de gloed van een heetgestookt materiaal noemt men wel *emissiepolarisatie*.

fig. 55 Breking aan een metaal. Het weerkaatste licht is intens en horizontaal gepolariseerd. Het zwakke gebroken licht moet dus sterk verticaal gepolariseerd zijn.

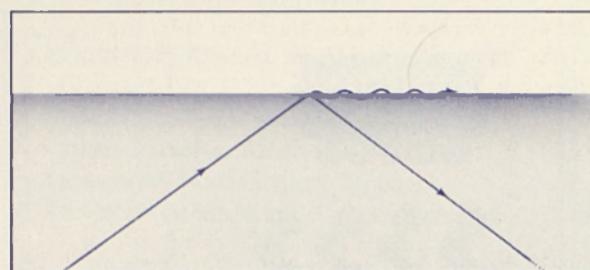


fig. 56 Bij totale reflectie plant zich een heel klein deel van het licht langs het oppervlak voort.

81 Oppervlaktegolven

Bij totale reflectie blijkt bij nauwkeurige beschouwing, dat toch niet al het licht weerkaatst wordt. Een zeer klein deel plant zich n.l. als een oppervlaktegolf langs het oppervlak voort (fig. 56); de intensiteit van dit deel wordt zeer snel kleiner naarmate de oppervlaktegolf verder komt. Een oppervlaktegolf is gepolariseerd, en wel in verticale richting, juist zoals het geval is bij de oppervlaktegolven die zich bij een aardbeving langs het aardoppervlak voortplanten. Oppervlaktegolven bij licht zijn weinig intens en in het algemeen niet waarneembaar. Het blijkt echter, dat deze golven verantwoordelijk zijn voor het ontstaan van één bepaald optisch verschijnsel in de atmosfeer: de *glorie*, een gekleurd aureool dat een waarnemer ziet verschijnen rond zijn eigen schaduw, als deze op mist valt. De polarisatie van de glorie is nogal gecompliceerd (§ 42) omdat een aantal effecten een rol spelen. Duidelijk is bijv. de *radiële* polarisatie van de ringen te zien, die zijn oorsprong in de oppervlaktegolven vindt. Het verschijnen van de glorie in waterdruppels is alleen mogelijk doordat deze oppervlaktegolven bestaan. Bovendien is dit het enige verschijnsel in de natuur waarbij de polarisatie door het optreden van deze golven bepaald wordt.

82 Optisch actieve metaalglangs

Hier gaat het om stoffen met een metaalachttige glans, die bij weerkaatsing ongepolariseerd licht *direct* omzetten in circulair licht. De oorzaak hiervan is gelegen in de spiraalvormige structuur van de moleculen waaruit ze zijn opgebouwd. Een dergelijk materiaal heeft de eigenschap bijv. rechtsdraaiend licht nog enigszins door te laten, maar linksdraaiend praktisch niet. Het weerkaatste licht heeft ook hier precies tegengestelde eigenschappen als het doorgelaten licht (§ 76), en is dus bijna volledig linksdraaiend circulair gepolariseerd. Zulk licht verschijnt eveneens als de weerkaatsing loodrecht op het oppervlak gebeurt, en ook als het invallend licht lineair of linksdraaiend gepolariseerd is. Dit laatste is uitzonderlijk, omdat bij weerkaatsing op andere materialen de draaizin van het licht kan veranderen (§ 88 en 91).

Het selectief doorlaten van één vorm van circulair licht noemt men *circulair dichroisme*, in analogie met gewoon (lineair) dichroisme (§ 84). Het verschijnsel hangt nauw samen met optische activiteit (§ 95), d.w.z. het roteren van het trillingsvlak van lineair licht zoals dat bijvoorbeeld in suikeroplossingen optreedt. Circulair gepolariseerde metaalglangs treedt op bij sommige synthetische stoffen, zoals vloeibare kristallen. In de natuur is het te zien bij enkele *kevers* die van een dergelijk optisch actief materiaal zijn opgebouwd (§ 50).

De draaizin van het weerkaatste licht hangt af van de draaizin van de spiraalvormige moleculen waaruit het materiaal bestaat. Bij vloeibare kristallen kan dit zowel links- als rechtsdraaiend zijn. Kevers die een circulair gepolariseerde glans vertonen, hebben dit in de vorm van linksdraaiend licht, omdat ze in principe alle opgebouwd zijn uit moleculen van dezelfde draaizin, ongeacht de soort. Hetzelfde zien wij gebeuren bij suikers, die als ze synthetisch gemaakt zijn, het polarisatievlak zowel naar links als naar rechts kunnen draaien, terwijl dezelfde suiker van organische oorsprong dit vlak slechts naar één kant (bijv. naar links) draait (§ 95).

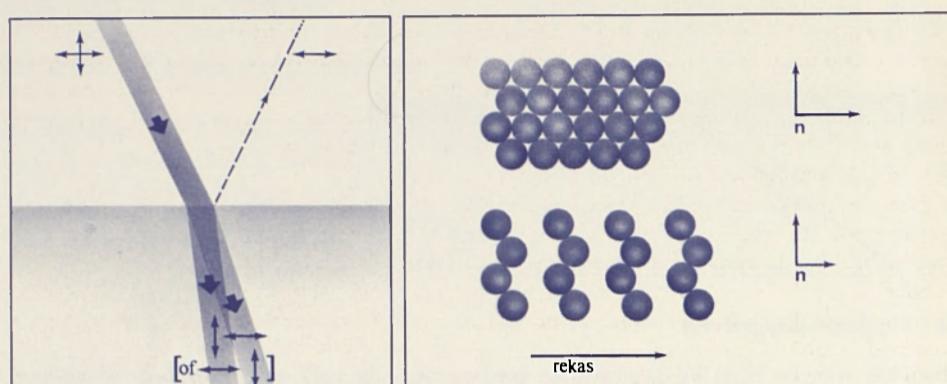


fig. 57 Bij doorgang door een dubbelbrekend materiaal wordt het licht gesplitst in twee gepolariseerde bundels.

fig. 58 Bij oprekking verandert het materiaal, en daarmee zijn brekingsindexen, in één richting. Het wordt dus dubbelbrekend.

83 Polarisatie door dubbelbreking

Dit is het verschijnsel dat licht, nadat het gebroken is en een materiaal is binnengetreden, hierna gesplitst wordt in twee lichtstralen die een iets verschillende weg volgen (fig. 57). Het blijkt dat deze lichtstralen beide volledig gepolariseerd zijn met trillingsrichtingen loodrecht op elkaar. Blijkbaar is de brekingsindex voor de verschillende polarisatierichtingen niet gelijk, zodat licht met een verschillende polarisatierichting ook verschillend gebroken wordt. Beide lichtstralen zijn praktisch even helder: het enige verschil hiertussen hangt natuurlijk af van de helderheid en polarisatie van de uitwendig weerkaatste lichtstraal. Ook hier moeten wij, na optelling van de weerkaatste en gebroken stralen, de intensiteit van de oorspronkelijk ingevallen ongepolariseerde lichtbundel terugkrijgen. Bij dubbelbreking spelen dus vier lichtstralen een rol, tegen drie bij gewone breking. Dubbelbreking treedt op bij een groot aantal vaste stoffen en mineralen: calciet, kwarts, ijs, opgerekt plastic, glas met inwendige spanningen enz. Legt men een stuk calciet op een getekende lijn, dan zien wij deze lijn dubbel; beide beelden zijn gepolariseerd (plaat 58 op blz. 80). Een stuk kwarts kan – juist als een glazen asbak of een prisma – zonlicht op een vaak kleurige wijze verstrooien. Men ziet dan gekleurde vlekken geprojecteerd op de muur. Houdt men een polarisatiefilter in deze lichtstraal of voor het kristal, dan veranderen deze vlekken van uiterlijk; bij rotatie van het filter verschuiven deze vlekken (§ 51). Een dergelijke verschuiving blijkt ook op te treden bij bijzonnen en andere haloverschijnselen die door breking in (dubbelbrekende) ijskristallen ontstaan (§ 36 en 37).

Het verschijnsel is misschien het gemakkelijkst te begrijpen bij het beschouwen van opgerekt plastic. Bij ongerekt plastic zijn de moleculen in dit materiaal op een bepaalde manier gerangschikt en treedt er geen dubbelbreking op. Hoe het licht ook trilt, het ‘ziet’ altijd hetzelfde materiaal en de brekingsindex is dus altijd hetzelfde. Een dergelijk materiaal heet *isotroop*. Rekt men nu het materiaal in een bepaalde richting op, dan wordt het *anisotroop*: licht dat loodrecht op de rekrichting trilt ziet nog steeds hetzelfde materiaal, maar licht dat in de rekrichting trilt ziet een ‘ander’, omdat hier de afstand tussen de moleculen groter is (en deze zich misschien ook wat (her)georiënteerd hebben). In deze laatste richting heeft het materiaal nu een andere (meestal kleinere) brekingsindex gekregen, en wordt licht anders gebroken (fig. 58). Als gevolg hiervan wordt ongepolariseerd licht opgesplitst in twee, loodrecht op elkaar gepolariseerde lichtbundels, die een iets verschillende weg door het materiaal volgen. De rekrichting noemen wij de *optische*

as. Als wij het materiaal nu een kwart slag draaien zodat het licht invalt in deze as, dan gebeurt er niets: loodrecht op de lichtbundel is de brekingsindex overal hetzelfde als voor de oplekking. Bij plastic is de dubbelbreking die men door oplekking kan verkrijgen niet erg sterk, maar bij mineralen, die van nature al anisotrop zijn, kan het wel zeer sterk zijn. Calciet is een bekend, sterk dubbelbrekend mineraal, waarbij het verschil in de brekingsindices 0,16 is. IJs is honderd keer minder dubbelbrekend. Enkele natuurlijke of kunstmatige mineralen, zoals rutiel of NaNO_3 , hebben een nog sterkere dubbelbreking dan calciet. Of de brekingsindex groter of kleiner is in de richting van de optische as hangt af van de aard van het materiaal: men kan zich evengoed voorstellen dat de optische as een *rekas* is als een *persas*. Bij mineralen is deze dubbelbreking natuurlijk niet het gevolg van oplekking, maar hier is het de stapeling van de moleculen in het materiaal zelf die deze anisotropie veroorzaakt. Dubbelbrekende materialen als hier beschreven noemt men *optisch éénassig*.

Men kan zich voorstellen dat het materiaal nogmaals, in een andere richting wordt opgerekt, bijv. loodrecht op de optische as. Een dergelijk materiaal heet *optisch tweeassig*, omdat hierin twee richtingen blijken te bestaan waarin invallend ongepolariseerd licht niet wordt opgesplitst. Deze optische assen zijn hier echter geen symmetrieassen, zoals bij een éénassig materiaal. De wijze waarop de dubbelbreking plaatsvindt hangt bij een éénassig materiaal slechts af van de hoek die de lichtbundel met de as maakt (en is maximaal voor een lichtweg loodrecht hierop). Bij een tweecassis materiaal hangt deze splitsing op een gecompliceerde wijze af van de manier waarop de lichtstralen door het kristal gaan. Optische tweecassisheid is overigens de hoogste anisotropie die in een materiaal kan bestaan: nogmaals oplekken verandert alleen maar de wijze waarop het tweecassis is. Optisch drieassige materialen bestaan dus niet. Het één- of tweecassis zijn van een materiaal is voor het bestuderen van de splitsing van lichtstralen niet zo belangrijk, maar speelt een wezenlijke rol bij de vorming van kleurpatronen in mineralen in gepolariseerd licht (§ 67, 68, 93, 94).

Het bestaan van polarisatie werd in 1690 ontdekt door Huygens, die de dubbelbreking van calciet bestudeerde. Eén brok calciet splitst een lichtbundel in tweeën; een tweede brok beide bundels nogmaals. Draait men deze brokken ten opzichte van elkaar, dan verplaatsen deze vier bundels zich niet alleen, maar worden zij ook afwisselend uitgedoofd. Men ziet dan twee, in plaats van vier bundels: het tweede brok werkt als een soort filter (vergelijk § 92). Het is de moeite waard, deze historische proef eens te herhalen. Men zal daarbij eveneens bemerken, dat uitwendige *weerkaatsingsverschijnselen* op dubbelbrekende materialen niet merkbaar verschillen van die op isotrope materialen (§ 74).

84 Polarisatie door selectieve absorptie (dichroisme en trichroisme)

Dit treedt bijv. op in polarisatiefilters (§ 7, 70). Hierbij wordt licht dat in een bepaalde richting trilt uitgedoofd, omdat het sterker wordt geabsorbeerd dan de trillingsrichting hier loodrecht op. Deze laatste component blijft dus over. Hierdoor wordt ongepolariseerd licht dus geleidelijk omgezet in lineair gepolariseerd licht (§ 5). De oorzaak van dit verschijnsel is (net als bij dubbelbreking) een verschil in opbouw van de stof in verschillende richtingen, dus 'oplekking'. Hierbij is van belang dat niet (alleen) de brekingsindex, maar vooral ook de absorptiecoëfficiënt van het materiaal in verschillende richtingen verschillen gaan vertonen, met bovengenoemd resultaat. Behalve filters hebben ook een aantal mineralen, zoals toermalijn, deze eigenschap, die ook wel *dichroisme* wordt genoemd. In samenwerking met inwendige reflecties kan dit effect soms tot verrassende verkleuringen leiden, zodat toermalijn ook wel als siersteen wordt gebruikt. Vaak bezitten dergelijke materialen deze eigenschap maar voor enkele kleuren, zodat bijv. rood licht nauwelijks, en blauw licht bijna volledig gepolariseerd wordt. Men neemt dan met een polarisatiefilter een verkleuring waar. Ook filters zelf polariseren trouwens niet alle kleuren in gelijke

mate: gekruiste filters laten meestal nog een zwak blauw licht door. Andere filters bezitten deze eigenschap in nog sterkere mate.

Mineralen die deze eigenschap vertonen kunnen naast éénassig, ook tweecassig zijn. Hierbij hangt de kleur van het licht dat sterk gepolariseerd wordt, af van de richting van waar men door het materiaal kijkt. Dit verschijnsel heet *trichroisme*, en treedt op bij epidoot, glaucofaan en cordiëriet. De verzamelnaam van dichroisme en trichroisme is *pleochroisme*.

Is een dichroïte stof metallics van uiterlijk, dan moet men verwachten dat het ook bij kaatsing licht zeer sterk zal polariseren. De verklaring hiervan is analoog aan die van het circulaire licht dat door optisch actieve metaalglans weerkaatst wordt (§ 82): één richting van het licht treedt nog wel enigszins in het materiaal (waarbij het overigens sterk geabsorbeerd wordt), en de tegengesteld trillende golven worden het sterkst gereflecteerd. Een dergelijk materiaal moet bijzonder sterk dichroït zijn. Het effect zal kunnen optreden bij sommige metallics éénkristallen.

Tenslotte willen wij een merkwaardig geval van dichroisme hier niet onbesproken laten. Dit ontstaat als het licht door georiënteerde naaldjes heengaat, die zelf niet dichroït hoeven te zijn. De oriëntatie van deze langwerpige voorwerpen zorgt er dan voor, dat er anisotropie optreedt, en ten gevolge hiervan dichroisme! Licht dat hier doorheen valt wordt dus gepolariseerd; de mate van polarisatie hangt echter veelal af van de golflengte (= kleur) van het licht. Op deze wijze kan men polarisatiefilters maken. Voor gepolariseerd licht in de natuur om ons heen blijkt dit mechanisme echter van zeer ondergeschikt belang te zijn. Het is echter interessant dat het wel verantwoordelijk is voor het gepolariseerd zijn van sterlicht: op de lange weg naar ons toe passeert dit licht interstellaire stofdeeltjes, die door het magneetveld van de melkweg georiënteerd zijn. Deze polarisatie is echter maar gering en bedraagt ten hoogste slechts enkele procenten, zodat ze met amateuristische middelen niet te zien is. Het effect is niettemin vermeldenswaard, omdat er door de astronomen veel onderzoek aan is gedaan (§ 58).

Het veranderen van de toestand van polarisatie door weerkaatsing e.d.

85 Inleiding

Gepolariseerd licht dat weerkaatst, gestrooid, gebroken wordt of door een medium heen gaat, verandert doorgaans van karakter. Deze verandering kan een toe- of afname van de polarisatiegraad zijn, een wijziging in trillingsrichting bij lineair licht, een omkering van de draaizin bij circulair licht of een omzetting van een gedeelte van het lineaire deel in circulair licht en omgekeerd. Een aantal van deze veranderingen zijn omkeerbaar: als bijvoorbeeld door een bepaald proces circulair licht wordt omgezet in lineair licht met een bepaalde oriëntatie van het polarisatievlak, dan is het omgekeerde doorgaans ook mogelijk bij dit proces.

Omzettingen van gepolariseerd licht van de ene soort in de andere blijken van belang te zijn in de natuur. Zo is bijvoorbeeld bijna al het circulaire licht om ons heen door omzetting van lineair licht ontstaan. Interessant is, dat bij een aantal van deze omzettingen de mate waarin dit gebeurt buitengewoon sterk kan afhangen van de *kleur* van het licht. In deze gevallen neemt men met een polarisatiefilter prachtige kleuren waar, die wij zonder dit filter niet zien.

In dit hoofdstuk zullen wij de processen beschrijven die tot veranderingen in de aard van de polarisatie aanleiding geven en van belang zijn voor het ontstaan van gepolariseerd licht in de natuur. In de eerste paar paragrafen beschrijven wij de processen waarbij het licht praktisch onafhankelijk van zijn kleur (golflengte) wordt omgezet, en hierna de processen waarbij de omzetting juist heel sterk afhangt van de kleur.

86 Strooiling van gepolariseerd licht en meervoudige strooiling

Is dit licht geheel of gedeeltelijk gepolariseerd, dan gedraagt een strooend deeltje zich als een filter: het licht dat niet tangentieel is gericht wordt geheel of gedeeltelijk uitgedoofd. Zou de zon bijvoorbeeld horizontaal gepolariseerd licht uitzenden (wat niet het geval is), dan zouden wij op 90° hiervan nabij de horizon een zeer donkere lucht verwachten, en recht boven de waarnemer wel licht zien, als tenminste de zon op de horizon staat. Dit is hetzelfde beeld dat wij zien als wij door een horizontaal gericht filter kijken naar de blauwe, door de ongepolariseerde zon verlichte lucht bij een lage zonnestand. In de praktijk doet zich de eerstgenoemde situatie uiteraard niet voor. Toch kan strooiling van een gepolariseerde lichtbron voorkomen, en wel bij schemering, als de lichtbron de gepolariseerde blauwe lucht is, die bijna over de hele hemel een gedeeltelijke polarisatie vertoont die loodrecht op de verbindingsslijn met de zon gericht is (dus noord-zuid als de zon in het westen of oosten juist onder de horizon staat). De strooiling van dit licht *onder water* moet dan dergelijke uitdovingen vertonen (§ 56).

Meervoudige strooing is een andere wijze waarop licht verstrooid kan worden. Dit doet zich voornamelijk voor als de zon onzichtbaar is, dus bij een zwaar bewolkte lucht of tijdens de schemering, als de zon zich onder de horizon bevindt. In dat geval worden deeltjes *alzijdig* verlicht door licht dat al eens eerder gestrooid is of door de grond weerkaatst. Bij een *zwaar bewolkte lucht* is dit alzijdige licht *ongepolariseerd*, zoals wij gemakkelijk uit beschouwingen als in § 72 kunnen besluiten. Bij een zware bewolking blijkt echter dat een deeltje *meer* licht ontvangt recht van boven (waar de afscherming van de bewolking het geringst is) dan van de horizon, zodat er hier toch sprake is van een voorkeursrichting van het invalrend licht. Hierdoor is het gestrooiide licht toch, althans nabij de horizon, in enige mate gepolariseerd. De richting is ook hier weer tangentieel ten opzichte van de lichtbron, dus in dit geval horizontaal (§ 24).

Strikt genomen hoort deze meervoudige strooing niet thuis in dit hoofdstuk, omdat het alzijdig invalrend licht hier *ongepolariseerd* is. Anders is deze situatie echter bij *schemering*, waar het deeltje zijn licht ontvangt van de gepolariseerde, blauwe hemel. Ook deze belichting is alzijdig, maar nu ontvangt het deeltje het *minste* licht van boven, omdat hier de lichtgevende dampkring het dunst lijkt. Van onder ontvangt het natuurlijk praktisch helemaal geen licht omdat het daar al donker is. Het meeste licht is dus afkomstig van de horizon. Dit licht is reeds verticaal gepolariseerd, omdat het tangentieel ten opzichte van de zon trilt. Als dit, gedeeltelijk gepolariseerde, verticale licht nogmaals gestrooid wordt, dan is ook dit gestrooiide licht verticaal gepolariseerd: de lichtbron bevindt zich immers gemiddeld gesproken op de horizon, en is ook van oorsprong al verticaal gepolariseerd. Door deze strooing vertoont bijv. het gebied tegenover de zon een duidelijke verticale polarisatie (§ 14) waar wij normaal een zwakke horizontale (= tangentiële) polarisatierichting zouden verwachten. Ook wolken in dit gebied, waar meervoudige strooing zich sterk manifesteert, vertonen dezelfde, afwijkende polarisatierichting (§ 23).

Behalve bij schemering is meervoudige strooing van gepolariseerd licht ook van belang voor de polarisatie van de lucht tijdens een *totale zonsverduistering*: hier licht de hemel op omdat het licht van *buiten* de totaliteitszone via meervoudige strooingen toch kan binnendringen. Het coronalicht is maar zwak en speelt bij de belichting slechts een zeer ondergeschikte rol. Het polarisatiematroon van de hemel onder deze omstandigheden wijkt dan ook volkomen af van dat tijdens schemering of overdag (§ 19).

87 Weerkaatsing van lineair gepolariseerd licht op gladde niet-metalen

Licht dat *loodrecht* op dit oppervlak trilt wordt bij kaatsing afgezwakt; bij de Brewster hoek is deze afzwakking volledig. Horizontaal licht wordt veel minder afgezwakt. Nu kan men licht met een polarisatievlak hiertussen in, bijvoorbeeld licht waarvan het polarisatievlak een hoek van 45° met dit oppervlak maakt, opgebouwd denken uit een horizontale en een verticale component die gelijktijdig trillen (§ 1). Omdat de horizontale component het minst wordt afgezwakt bij kaatsing, blijkt bij het weer samenstellen van deze twee trillingen dat het polarisatievlak van het gekaatsde licht *horizontaler* is geworden (fig. 59)! Bij de Brewster hoek is het polarisatievlak natuurlijk geheel horizontaal geworden.

Behalve deze draaiing gebeurt er bij een *scherende* inval van het licht niets met het polarisatievlak. Dit geldt in het algemeen als de invalshoek groter is dan de Brewster hoek. Is de invalshoek echter kleiner dan deze hoek, en de inval dus meer loodrecht, dan blijkt dat het polarisatievlak bovendien *gespiegeld* wordt (fig. 60). Het spiegelbeeld van een polarisatiefilter kan dus tegengesteld gepolariseerd zijn aan het filter zelf! In plaat 51 op blz. 76 is dit gedemonstreerd met een gewone spiegel, die in dit opzicht dezelfde eigenschap heeft (§ 91). Het tegengesteld zijn van de polarisatie van het spiegelbeeld is natuurlijk het best te zien als het polarisatievlak van het filter een hoek van ongeveer 45° met het spiegeldoppervlak maakt. Deze spiegeling wordt veroorzaakt doordat, bij een invalshoek kleiner dan de Brewster hoek, verticaal licht een extra fasesprong van 180° ondergaat, terwijl horizontaal licht dit niet doet. Bij een invalshoek groter dan deze Brewster hoek treedt deze extra fasesprong niet op (fig. 61). Dit kan men in principe

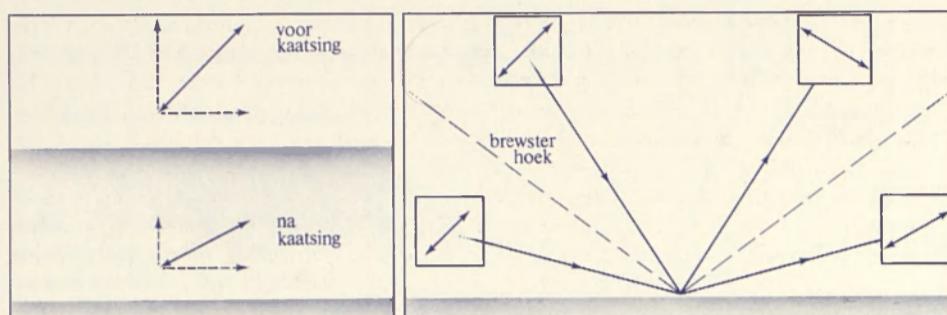


fig. 59 De polarisatierichting van lineair licht wordt bij weerkaatsing horizontaler.

fig. 60 Bij weerkaatsing steiler dan de Brewster hoek spiegelt het polarisatievlak. Bij scherender weerkaatsing gebeurt dit niet.

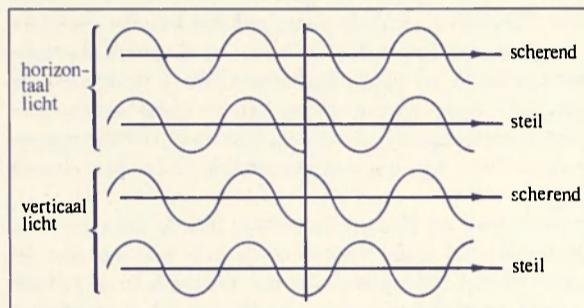


fig. 61 Fasesprong bij uitwendige weerkaatsing. Bij een steiler inval dan de Brewster hoek ondergaat verticaal licht een extra fasesprong van 180° ten opzichte van de andere mogelijkheden.

bestuderen door het spiegelbeeld van een lineair filter door een ander filter te bekijken, terwijl de positie van dit eerste filter, dus ook zijn invalshoek, gevarieerd wordt. Afhankelijk van zijn positie blijkt de polarisatierichting van het spiegelbeeld dan te veranderen. Fraaier lukt dit proefje echter met twee circulaire filters, waarom dezelfde reden de draaizin van het gespiegelde licht omkeert bij de Brewster hoek (zie de volgende paragraaf). In de natuur ziet men dit soort spiegelingen van het polarisatievlak optreden als gepolariseerd licht op een glad water- (of metaal-) oppervlak valt (§ 29 en 48).

De hierboven genoemde fasesprong kan zich ook nog op een andere wijze uiten, en wel als er sprake is van interferentie van twee lichtgolven, waarbij de ene weerkaatst is met een hoek groter en de ander met een hoek kleiner dan de Brewster hoek. De kleuren die bij zulke interferenties verschijnen hangen af van het verschil in de optische weglengte van de interfererende stralen (dat is de weglengte, uitgedrukt in de golflengte van het licht). Aangezien deze weglengte voor verticaal licht door deze extra fasesprong een halve golflengte verschilt van die voor horizontaal licht, zijn ook de interferentiepatronen verschillend (zelfs tegengesteld), zoals wij dan met een filter kunnen vaststellen. In de natuur treedt zoets op bij overtuigende *mistbogen* die door dergelijke interferenties gevormd worden. Hierdoor is het licht van de mistboog niet alleen gepolariseerd, maar blijken de overtuigende bogen ook te verschuiven als men het licht met een filter maximaal uitdooft (§ 31).

Men kan zich tenslotte nog afvragen wat er gebeurt als het kaatsend licht niet volledig, maar slechts *gedeeltelijk* gepolariseerd is. In dat geval kan men de effecten van het weerkaatsen van het ongepolariseerde en het gepolariseerde deel van het licht bij elkaar optellen: het ongepolariseerde deel wordt gedeeltelijk in horizontaal licht omgezet en het gepolariseerde deel draait zijn trillingsvlak naar de horizontale richting toe, terwijl dit vlak bovendien al dan niet gespiegeld wordt. Het netto effect is een toename van de polarisatiegraad en een sterkere draaiing van het polarisatievlak naar de horizontale richting dan wanneer het invallende licht volledig gepolariseerd is.

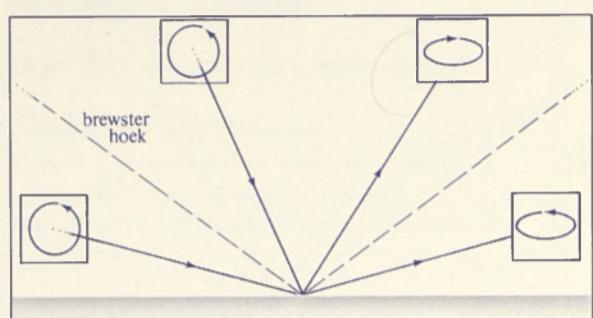


fig. 62 Circulair licht wordt bij weerkaatsing gedeeltelijk in lineair licht omgezet. Bij een inval steiler dan de Brewster hoek keert tevens de draaizin om.

88 Weerkaatsing van circulair licht op gladde niet-metalen

Dit licht wordt elliptisch, omdat het 'lichtcirkeltje' wordt afgeplat: het verticale deel van het cirkeltje wordt minder goed weerkaatst. Met andere woorden: een gedeelte van het circulaire licht wordt omgezet in lineair licht. Dit kan men inzien door het licht op te vatten als opgebouwd uit verticaal en horizontaal lineair licht, die 90° in fase zijn verschoven (§ 2); de verticale component wordt dan minder sterk gekaast. De polarisatierichting van het aldus toegevoegde lineaire licht is natuurlijk horizontaal. In dit opzicht gedraagt circulair licht juist als ongepolariseerd licht bij spiegeling: een gedeelte van het ongepolariseerde/circulaire licht wordt omgezet in horizontaal, lineair licht (§ 74).

Juist zoals in § 87, ondergaat het verticale deel bij een kleinere invalshoek dan de Brewster hoek een fasesprong, die niet plaatsvindt bij horizontaal licht. Voor circulair licht betekent dit, dat voor een vrij loodrechte inval de draaizin van het licht *omkeert*; bij een scherende inval gebeurt dit niet (fig. 62). Als circulair licht door een oppervlak weerkaatst wordt, kan het dus niet meer het filter passeren waar het oorspronkelijk vandaan komt (zie ook § 91 en plaat 72 op blz. 100). Hiervan maakt men wel gebruik om hinderlijke reflecties weg te nemen, door er een circulair filter voor te plaatsen (bijv. voor *lichtende cijfertjes*, § 64). Omdat deze filters het licht omzetten in lineair licht (§ 7), stralen deze cijfers dus lineair gepolariseerd licht uit. Het omkeren van de draaizin, zoals dat bij steile inval wel, en bij scherender inval niet gebeurt, kan men op aanschouwelijke wijze bestuderen door het spiegelbeeld van een circulair filter tegen een ruit met een tweede filter te bekijken, op de manier zoals aangegeven in § 87.

89 Weerkaatsing van lineair licht op ruwe oppervlakken

Dit licht wordt voor een behoorlijk deel *gedepolariseerd* door de meervoudige weerkaatsingen die het kan ondergaan op oneffenheidjes, en die ieder voor een andere draaiing van het polarisatielvlak kunnen zorgen. Deze depolarisatie, die dus een afname van de polarisatiegraad betekent, is het sterkst voor heldere oppervlakken, waar het licht vele weerkaatsingen kan hebben ondergaan. Dit is natuurlijk in overeenstemming met het Umov effect (§ 77). Niettemin blijft er nog polarisatie over, en de blauwe, verticaal gepolariseerde lucht na zonsondergang blijkt na weerkaatsing op bijv. een zandvlakte toch nog verticaal gepolariseerd licht op te leveren (§ 45). Bij een donkere asfaltweg is deze polarisatie sterker. Met de zon boven de horizon ziet men deze afwijkende polarisatie niet, omdat dan de directe weerkaatsing van het heldere zonlicht volledig overheerst en dus ook de polarisatie bepaalt. Bij het ondergaan van de zon verandert dit. Op zo'n 90° van de zon merkt men dit echter niet aan de polarisatierichting, omdat de verticale richting hier toevallig correspondeert met tangentieel ten opzichte van de zon. Anderzijds zien wij dan wel het verschil in polarisatierichting in dit gebied en dat bijv. in de richting van de zon, waar de lucht bijna ongepolariseerd is en er dus slechts een zwakke, horizontale polarisatie van de zandvlakte te zien is.

Weerkaatsing van lineair licht op ruwe oppervlakken zien wij in de natuur bij schemer optreden op *vlakten* of ruwe *wateroppervlakken*, of overdag in de schaduw (§ 45, 46 en 54). Het asgrauwe licht van de maan blijkt gedepolariseerd *aardlicht* te zijn (§ 58).

90 Totale reflectie van gepolariseerd licht

Zowel horizontaal als verticaal licht wordt bij totale reflectie volledig weerkaatst. Bij deze kaatsing treedt echter een extra fasesprong op voor verticaal licht, juist zoals bij weerkaatsing op gladde oppervlakken onder de Brewster hoek (§ 87). Nu is deze fasesprong echter *geen* 180° , maar hangt hij af van de invalshoek en de brekingsindex van het materiaal. Er is één invalshoek waarbij de fasesprong het grootst is: hoe hoger de brekingsindex, des te groter is de maximale fasesprong die kan optreden. Als gevolg van deze sprong wordt een gedeelte van het circulaire licht *omgezet* in lineair licht, en omgekeerd lineair licht in circulair licht. De totale hoeveelheid gepolariseerd licht blijft hierbij ongewijzigd. Lineair licht wordt alleen maar dan geheel in circulair licht omgezet, als én de fasesprong 90° bedraagt, én het polarisatievlak van de invallende bundel een hoek van 45° met het weerkaatsend oppervlak maakt. Het blijkt dat voor slechts enkele materialen, zoals diamant of rutiel, de brekingsindex zo hoog is dat deze sprong al bij één totale reflectie bereikt kan worden. Bij de meeste stoffen lukt dit pas na twee of meer kaatsingen. Toch kan men regelmatig waarnemen dat licht door totale reflecties circulair is geworden. Zonlicht dat bijvoorbeeld door een hoekig, doorzichtig voorwerp is gegaan (een glazen *ashak*, bijvoorbeeld) kan hierbij zoveel brekingen, totale en niet totale reflecties hebben ondergaan, dat sommige van deze combinaties inderdaad bijna volledig circulair licht opleveren. Wordt zo'n voorwerp door de blauwe, gepolariseerde hemel belicht, dan is het aantal reflecties dat circulair gepolariseerd is doorgaans groter (§ 11 en 51). *Onder water* blijkt er eveneens circulair licht te kunnen ontstaan door totale reflectie (§ 56).

Als lineair licht door totale reflectie geheel of gedeeltelijk is omgezet in circulair licht, dan hangt de draaizin van dit licht af van de hoek die het trillingsvlak van het invallend licht met het weerkaatsend oppervlak maakt. Als dit vlak, gezien vanaf de waarnemer, van linksonder naar rechtsboven helt, ontstaat er rechtsdraaiend licht, en omgekeerd (als tenminste het oppervlak op de grond ligt, zie fig. 63). Omdat de invalshoek bij totale reflectie altijd groter is dan de Brewster hoek, heeft het overblijvende lineaire licht hetzelfde trillingsvlak als voor de kaatsing, en wordt dus niet gespiegeld (§ 87).

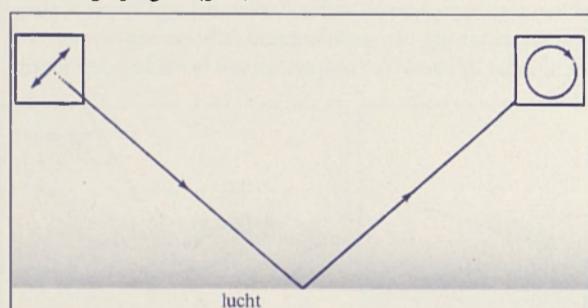


fig. 63 Omzetting van lineair licht in circulair licht bij totale reflectie.

91 Weerkaatsing van gepolariseerd licht op metallische oppervlakken

In een aantal opzichten is een dergelijke weerkaatsing te vergelijken met die op een niet-metaal. Ook hier treedt bij een zeer scherende invalshoek geen spiegeling van het polarisatievlak op, en bij een loodrechter wel, weer ten gevolge van een extra fasesprong van 180° van de verticale lichtcomponent. Een verschil is echter, dat nu het faseverschil tussen de horizontale en verticale component *geleidelijk* toeneemt van 0° naar 180° als de invalshoek wordt gevareerd van scherend naar loodrecht. Dit betekent dat er, juist als bij totale reflectie, een gedeelte van het invallend

lineaire licht wordt omgezet in circulair licht (plaat 6-7 op blz. 21). Bij één bepaalde invalshoek, die wel de *hoofdinvvalshoek* wordt genoemd, is de faseverschuiving precies 90° . Hier kan dus, als het trillingsvlak van het invallend licht de juiste hoek met het oppervlak maakt, dit lineaire licht *geheel* in circulair licht worden omgezet. Deze hoek is geen 45° , zoals bij totale reflectie, maar heeft een andere waarde omdat verticaal licht minder effectief weerkaatst wordt dan horizontaal licht (§ 76); men noemt deze hoek het *hoofdazimut*. Volledig circulair licht kan alleen maar optreden als de intensiteit van het horizontale licht gelijk is aan die van het verticale licht na kaatsing, zodat het trillingsvlak voor kaatsing steiler dan 45° op het oppervlak moet staan. De draaizin van het circulaire licht wordt op dezelfde wijze bepaald als bij totale reflectie (fig. 63). Natuurlijk wordt invallend *circulair* licht bij de hoofdinvvalshoek geheel in lineair licht omgezet. Er zijn sterke overeenkomsten tussen de Brewster hoek en de hoofdinvvalshoek. In beide gevallen wordt hier de faseverschuiving tussen horizontaal en verticaal licht groter dan 90° , zij het dat dit bij de Brewster hoek sprongsgewijs gebeurt. Ook is de hoofdinvvalshoek ongeveer dezelfde invalshoekrichting als die waarbij ongepolariseerd licht maximaal in lineair licht wordt omgezet (§ 76). Bij weerkaatsing van lineair licht op metalen treedt er, evenals bij niet-metalen, een draaiing op van het trillingsvlak van het overblijvende lineaire licht in horizontale richting (§ 87) en bij steiler inval dan de hoofdinvvalshoek bovendien een spiegeling van het polarisatievlak of een omkering van draaizin, omdat de faseverschuiving boven de 90° komt (§ 87 en 88). Wel is de hoofdinvvalshoek groter (dus scherender) dan de Brewster hoek. Al deze omzettingen kan men o.a. zien als de blauwe lucht door metalen (chroom op auto's) wordt weerkaatst (§ 48). Bij *spiegels* treedt in principe hetzelfde op. Een verschil is echter, dat de invalshoek op de metaallaag hier doorgaans niet scherend is, omdat het licht eerst door het glas is gebroken (fig. 64). Hierdoor kan het gebeuren dat de hoofdinvvalshoek zelfs bij een zeer scherende inval op de spiegel niet bereikt kan worden. De hoeveelheid circulair licht die bij weerkaatsing van lineair licht gevormd wordt is daarom meestal niet erg groot, maar wij zien wel bij praktisch iedere invalshoek de spiegeling van het polarisatievlak zeer fraai optreden (plaat 51 op blz. 76). Ook het omkeren van de draaizin van circulair licht laat zich fraai demonstreren met een spiegel (plaat 72 op blz. 100).

92 Breking, dubbelbreking en optische rotatie van gepolariseerd licht: kleurverschijnselen in gepolariseerd licht, een overzicht

Het *breken* van gepolariseerd licht door een isotrope (dus niet dubbelbrekende) stof levert weinig nieuwe gezichtspunten op. Juist zoals bij weerkaatsing van gepolariseerd licht op een niet-metaal wordt het polarisatievlak *gedraaid* (§ 87). Omdat de verticale component van het licht beter wordt

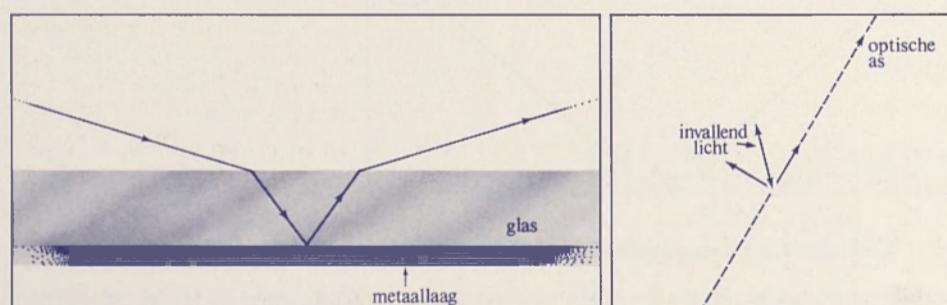


fig. 64 Bij een spiegel is de invalshoek op de metaallaag altijd erg steil; praktisch voor iedere invalshoek wordt het polarisatievlak gespiegeld.

fig. 65 Invallend lineair licht wordt bij dubbelbreking gesplitst in twee, loodrecht op elkaar staande trillingen; één ervan trilt in de richting van de optische as.

doorgelaten dan het horizontale deel, geschiedt de draaiing hier in verticale richting in plaats van in horizontale richting, zoals dat bij weerkaatsing het geval is. Men kan dit waarnemen door gepolariseerd licht door een ruit te bekijken. Deze draaiing is echter meestal niet zo groot als bij weerkaatsing, omdat het verschil in doorlaatbaarheid van de twee polarisatierichtingen doorgaans niet zo groot is (natuurlijk licht wordt bij breking dan ook veel minder gepolariseerd dan bij weerkaatsing).

Gepolariseerd licht dat door een *dubbelprekende* stof heengaat kan zich echter afwijkend gedragen. Hier wordt het licht gesplitst in twee, tegengesteld gepolariseerde componenten, die met een iets verschillende snelheid een iets verschillende weg door het materiaal volgen (fig. 65). Is de dubbelprekking nu *sterk*, dan zijn deze wegen toch zodanig verschillend dat men duidelijk twee verschillende lichtstralen uit het materiaal ziet komen. Dit is bijvoorbeeld het geval bij calcietkristallen. Als nu de trillingsrichting van het invallend licht tegengesteld is aan die van één van de doorgelaten stralen, dan verdwijnt deze, en blijft er slechts één breking over: het dubbelprekend kristal lijkt enkelbrekend geworden te zijn! Bij een andere oriëntatie van het polarisatievlak ten opzichte van het kristal zien wij wel beide, verschillend gebroken stralen, zij het, dat ze in verschillende mate afgezwakt kunnen zijn. De polarisatierichtingen van de uittredende lichtstralen staan natuurlijk altijd loodrecht op elkaar (§ 83).

Bij een *zwakke* dubbelprekking worden de lichtstralen weinig gesplitst, zodat beide gepolariseerde lichtstralen (die van dezelfde bron afkomstig zijn) niet merkbaar een andere weg door het materiaal volgen. Toch geeft juist deze situatie aanleiding tot prachtige verschijnselen! Omdat de brekingsindex voor deze golven toch enigszins verschilt, is de *snelheid* van deze golven iets verschillend. Hierdoor gaat de ene golf geleidelijk achterlopen ten opzichte van de andere, en treedt er dus een geleidelijke faseverschuiving tussen de golven op. Hierdoor verandert ook de polarisatie van het totale licht (dus beide componenten bij elkaar opgeteld) en zal dit licht na

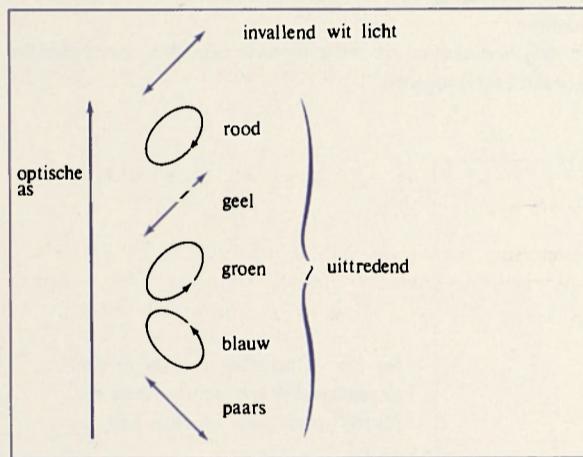


fig. 66 De wijze waarop de polarisatie van licht verandert bij passage door een dubbelprekend materiaal hangt af van zijn kleur.

uittrede gedeeltelijk circulair geworden zijn of een afwijkende richting gekregen hebben (fig. 66). Dit is precies hetzelfde wat optreedt bij totale reflectie of weerkaatsing op metalen van gepolariseerd licht (§ 90 en 91). Het verschil is echter, dat de faseverschuiving bij deze weerkaatsingen nauwelijks afhangt van de golflengte, en dus de kleur van het licht, maar dat dit bij dubbelprekking *wel* het geval is: als men na een bepaalde weg door het dubbelprekend materiaal het wegverschil tussen de golven bijv. 0,0004 mm is geworden, dan correspondeert dit met één golf met een lengte van 0,0004 mm en met een halve golf van 0,0008 mm. Hierdoor is de wijze waarop het binnenvallend gepolariseerd licht wordt omgezet in licht van een andere polarisatie sterk kleurafhankelijk, en het resultaat is dat wij bij invallend wit, gepolariseerd licht *prachtige kleuren* te voorschijn komen, die wij zonder een filter niet zien (plaat 61-63 op blz. 85). Welke kleuren wij dan precies te zien krijgen bij een bepaalde stand van een lineair filter, of bij gebruik

van een circulair filter, hangt af van de mate waarin de ene golf achterloopt op de andere. Natuurlijk verschijnen de kleuren ook bij invallend circulair licht: het verschijnsel is geheel omkeerbaar. De kleuren die men te zien krijgt zijn vaak fraaier dan bij de 'Newtonse kleuren' (§ 93). Als het invallende licht slechts gedeeltelijk gepolariseerd is, dan zijn de kleurverschijnselen natuurlijk zwakker. Bij invallend ongepolariseerd licht gebeurt er niets, net zomin als bij totale reflectie van ongepolariseerd licht: in dit geval hebben de golven die loodrecht op elkaar staan niet met elkaar te maken, en resulteren faseverschuivingen dus ook niet in polarisatie-effecten. Omzetting van gepolariseerd licht door dubbelbreking noemt men wel *chromatische polarisatie*. Het treedt op bij autoruiten, ijs(bloemen) of hagelstenen, mineralen, nagels, hard plastic met inwendige spanningen of opgerekt zacht plastic, en voorts bij andere doorzichtige stoffen die mechanische spanningen hebben (§ 49, 52, 53).

Er bestaat nog een tweede gelegenheid om kleurverschijnselen in gepolariseerd licht te zien. Dit doet zich voor bij enkele mineralen (kwarts) en suikeroplossingen. Deze stoffen hebben namelijk de eigenschap dat zij het polarisatievlak *draaien*. De mate waarin dit gebeurt hangt zeer sterk af van de kleur van het licht. Rood licht wordt bijvoorbeeld veel minder sterk gedraaid dan blauw licht (fig. 67). Bij invallend wit, lineair gepolariseerd licht treden dus kleurverschijnselen op: omdat het blauwe licht minder gedraaid is dan het rode licht, kunnen wij ze nooit gelijktijdig uitdoven met een tweede filter. Doordat het draaiend vermogen zo sterk van de kleur afhangt, zien wij hier andere kleuren verschijnen dan bij dubbelbreking. Dit verschijnsel heet *optische rotatie*; stoffen die dit vermogen bezitten heten *optisch actief*. Ook hier is het dus zo, dat men de kleuren slechts ziet bij gebruik van twee filters (één om het invallend licht te polariseren en één om waar te nemen); bij invallend natuurlijk licht gebeurt er niets. Bij optische rotatie wordt lineair licht omgezet in lineair licht van een andere trillingsrichting, maar verschijnt er *geen* circulair licht, dit in tegenstelling tot dubbelbreking. Als het invallend licht circulair gepolariseerd is, verschijnen er dus ook geen kleuren.

In de volgende drie paragrafen zullen wij wat dieper op verschillende aspecten van optische rotatie en dubbelbreking (chromatische polarisatie) ingaan.

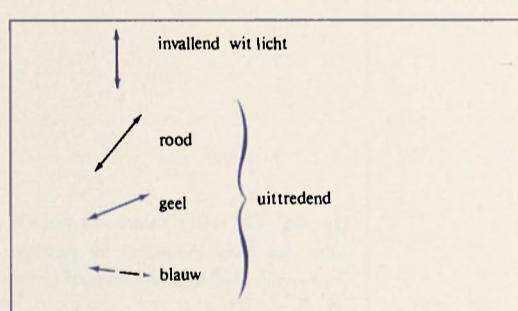


fig. 67 Omzetting van lineair licht na passage door een optisch actieve stof. Hierbij wordt geen circulair licht gevormd.

93 Chromatische polarisatie

Zoals gezegd, verandert de polarisatietoestand van het licht als het door een (zwak) dubbelbrekend materiaal gaat. Deze verandering hangt nu echter af van de kleur van het licht. Hoe de polarisatie van een bepaalde kleur zal zijn hangt af van de vertraging die de golf loodrecht op de optische as (§ 83) heeft gekregen ten opzichte van de andere golf die dus parallel hiermee trilt. Natuurlijk kan ook deze laatste golf het langzaamst gaan. Als de vertraging nu bijv. precies $\frac{1}{4}$ van één golflengte λ bedraagt, dan kan lineair licht geheel in circulair licht worden omgezet door zo'n plaatje, mits de optische as hiervan de juiste hoek (45°) met de trillingsrichting van het invallend licht maakt. Hetzelfde gebeurt natuurlijk als dit wegverschil (dus de vertraging) $1\frac{1}{4}$, $2\frac{1}{4}$

enz. golflengte is. Omgekeerd zet hetzelfde plaatje dan circulair licht in volledig lineair licht om. Rood licht heeft een golflengte (λ) van ongeveer $0,7 \mu$, geel $0,6 \mu$, groen $0,5 \mu$ en blauw licht $0,45 \mu$. Heeft een bepaald plaatje nu een wegverschil van bijv. $0,14 \mu$, dan correspondeert dit met precies $\frac{1}{4}$ golflengte van gelig licht van $0,56 \mu$. Maakt de optische as van het plaatje bovendien een hoek van 45° met de trillingsrichting van het invallende lineaire licht, dan wordt het dus geheel in *circulair* licht omgezet. Voor de andere kleuren bedraagt dit wegverschil dan $0,20 \mu$ (rood), $0,28 \mu$ (groen), en $0,31 \mu$ (blauw). Dit betekent dat ook dit licht hoofdzakelijk circulair wordt (fig. 68). Een dergelijk plaatje, dat één kleur geheel in circulair licht omzet en de andere kleuren *bijna* geheel omzet noemt men wel een *kwartlambda plaatje*. Omgekeerd zet dit plaatje circulair licht op dezelfde wijze in lineair licht om. Plakt men zo'n plaatje op een lineair filter, dan heeft men een bijna kleuronafhankelijk circulair filter gemaakt (§ 7).

Anders is de situatie als het wegverschil bijv. $0,7 \mu$ bedraagt. Weliswaar wordt dan licht met een golflengte van $0,56 \mu$ wederom geheel van lineair in circulair licht omgezet (het wegverschil bedraagt nu één gehele golf plus één kwart golf), maar voor de andere kleuren is dit nu anders dan bij het kwartlambda plaatje. Voor rood licht van $0,7 \mu$ is het wegverschil nu precies één golflengte, en hierdoor is de polarisatie van dit licht voor en na het plaatje volkomen dezelfde gebleven. Groen licht van $0,5 \mu$ heeft nu een wegverschil van één golflengte plus $0,4 \mu$ golflengten, en blauw licht van $0,45 \mu$ één plus $0,55 \mu$ golflengten. Hierdoor is de polarisatietoestand van het uittredend licht sterk verschillend van kleur tot kleur (fig. 69), en zien wij bij verschillende standen en soorten filters steeds andere kleuren verschijnen. De kleuren die wij te zien krijgen zijn ongeveer dezelfde als die bijv. bij kransen (§ 43) in de lucht of bij olievlekken op water

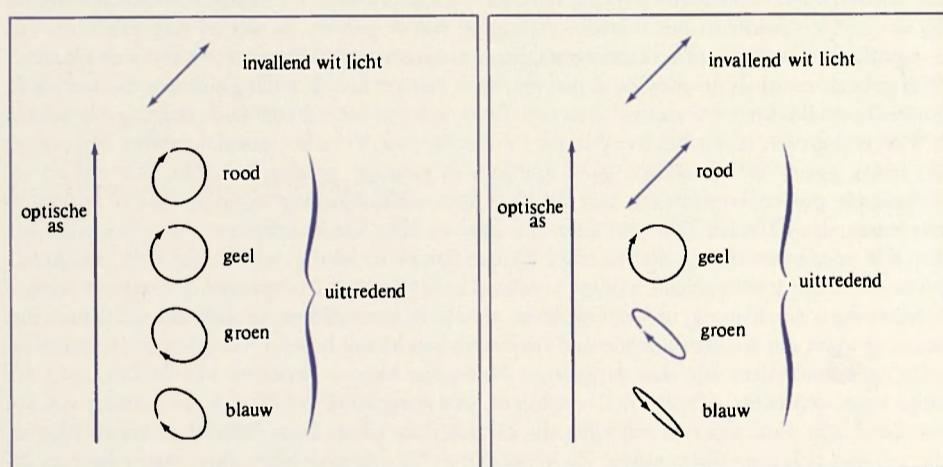


fig. 68 Omzetting lineair licht na passage kwartlambda plaatje (wegverschil $0,14 \mu$).
fig. 69 Omzetting lineair licht bij wegverschil $0,7 \mu$.

verschijnen: het zijn de zgn. *Newtonse kleuren*. Merk op, dat licht wat ongeveer een halve golflengte vertraging heeft ondergaan, zoals het blauw en groen in dit voorbeeld, weer bijna lineair is geworden, maar nu met een tegengestelde richting!

Wij zien bovendien dat een wegverschil van $0,20$ tot $0,31$ golflengte, zoals optreedt bij een kwartlambda plaatje voor een golflengtegebied van $0,45$ tot $0,7 \mu$, nu optreedt voor een veel nauwer golflengtegebied van $0,58$ tot $0,52 \mu$ (nu is het wegverschil bovendien nog een extra golflengte, maar dat is van geen belang). In dit gebied, dat maar weinig kleurverschil vertoont, gedraagt het licht zich dus precies als het bij een kwartlambda plaatje doet voor het hele kleurgebied van $0,45$ tot $0,7 \mu$!

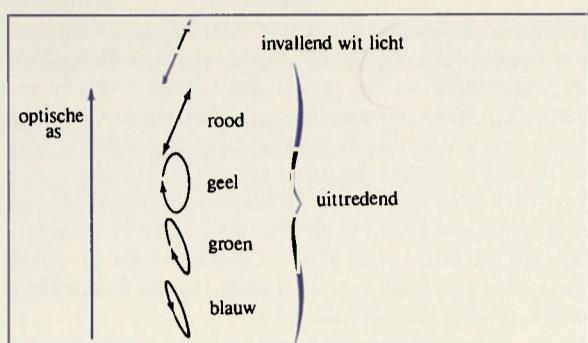


fig. 70 Omzetting lineair licht bij wegverschil $0,7 \mu$, waarbij het trillingsvlak van het invalwend licht een andere hoek dan 45° met de optische as maakt.

Is het stuk materiaal zo dik of zo sterk dubbelbrekend dat de vertraging erg groot wordt, bijv. meerdere golflengten, dan kan de vertraging over een klein golflengtegebiedje al gauw een hele extra golf bedragen. Als bijv. de faseverschuiving 10μ bedraagt, dan lopen de golven van groen licht van $0,5 \mu$ twintig golflengten ten opzichte van elkaar achter en voor licht van $0,53 \mu$, dat bijna dezelfde kleur heeft, negentien golflengten. Tussen deze golflengten in krijgen wij afwijkende polarisatie, maar de kleuren waarmee deze golflengten corresponderen zijn bijna dezelfde (groen dus). Hetzelfde treedt op bij de andere kleuren zoals rood enz. Het gevolg is dat wij met een bepaald filter een mengeling van vele kleuren krijgen, en dus praktisch *wit* licht zien. Bij een dergelijke *sterke* dubbelbreking *verdwijnen* dus de kleuren. De fraaiste kleuren zien wij dus bij een niet te zwakke en niet te sterke vertraging van de golven, en wel bij wegverschillen van 1-3 golflengten. Grottere of kleinere vertragingen zorgen voor het fletser worden van de kleuren. Wat gebeurt er nu als de optische as niet een hoek van 45° met de trillingsrichting van het invalwend licht maakt, maar een andere? Dan is de intensiteit van het licht dat in de richting van deze as trilt of veel groter, of veel kleiner dan die loodrecht erop. Voor het gemak beperken wij ons tot dit eerste geval; in het andere geval gebeurt in principe precies hetzelfde. Als wij nu de uittredende golven samenstellen met dezelfde faseverschuiving van $0,7 \mu$ als in het voorbeeld hierboven, dan blijkt het licht voor de meeste kleuren bijna lineair gebleven te zijn, met ongeveer dezelfde polarisatierichting. Slechts *enkele* kleuren (groen en blauw) hebben een flink afwijkende polarisatierichting ten opzichte van het invalwend licht (fig. 70). Dit betekent, dat wij met *gekruiste* filters bijna alle kleuren, op een enkele na, zeer sterk verwakken, en deze enkele kleuren dus prachtig tegen een donkere achtergrond zien! Men kan hieruit begrijpen dat deze kleurverschijnselen inderdaad rijker zijn dan de gewone Newtonse kleuren (kransen, olievlekken, etc.) die altijd tegen een lichte achtergrond verschijnen. Als omgekeerd het filter in de richting van het invalwend licht staat, dan zien wij bijna alle kleuren door elkaar heen, behalve de enkele kleuren die wij met gekruiste filters zagen. Zo verschijnt er bij gekruiste filters bijv. blauw licht en bij evenwijdige filters wit licht met een rode zweem: de kleurverschijnselen zijn geheel tegengesteld (wit wordt zwart en blauw wordt rood enz.). Hieruit blijkt wel, dat men de mooiste kleurverschijnselen te zien krijgt bij gekruiste filters, omdat er dan geen 'wit' licht wordt waargenomen, hoe de stand van de optische as ook is! Cellofaan, plastic, mineralen, autoruiten, ijsbloemen en al dit soort materialen bekijkt men dus het beste met gekruiste filters. Onder een gekruist filter kunnen wij hier ook een links- en rechtsdraaiend filter verstaan, hetgeen tot het ontstaan van dezelfde soort verschijnselen aanleiding geeft als gekruiste lineaire filters, die beide een hoek van 45° met de optische as maken. Deze overwegingen betekenen dus, dat er in het algemene geval (willekeurige stand van de as) maar weinig licht wordt uitgezonden met een afwijkende polarisatierichting. In feite treedt hier hetzelfde op als bij totale reflectie: als hier het trillingsvlak een andere hoek dan 45° met het weerkaatsend oppervlak maakt, zal het meeste licht ongeveer zijn oorspronkelijke polarisatie behouden, en dooft men met een gekruist filter bijna al het weerkaatsende licht uit (maar in dit geval verschijnen er natuurlijk geen kleuren, zie § 90).

Tenslotte nog dit. Als er twee dubbelbrekende plaatjes over elkaar vallen, dan zal de kleur die er dan te voorschijn komt afwijken van die van de afzonderlijke plaatjes. Deze kleuren 'mengen' echter anders dan men normaal gewend is, en het is heel wel mogelijk dat een combinatie van bijv. rood en rood, geel of een andere kleur oplevert. De kleur die verschijnt hangt slechts af van het optredend wegverschil bij de combinatie, en deze heeft als zodanig eigenlijk niets te maken met de oorspronkelijke, mengende kleuren. Zie bijv. plaat 61-62 op blz. 85.

94 Kristaloptica (optische mineralogie)

Regelmatige kleurpatronen die wij te zien krijgen in mineralen, als deze in gepolariseerd licht bekeken worden zijn meestal op het bovenstaande terug te voeren. De studie van de figuren die hierbij ontstaan noemt men wel de kristaloptica (§ 65-70). Het eenvoudigst zijn de verschijnselen te begrijpen die wij zien bij éénassige mineralen. Kijken wij *precies* langs de optische as hiervan, dan gebeurt er *niets* met het invallende lineaire licht (en natuurlijk ook niet met circulair licht dat wij op dezelfde wijze kunnen beschouwen) en is het licht in geval van gekruiste filters dus geheel uitgedoofd. Juist náást deze richting zien we echter wél een zwakke dubbelbreking, omdat wij dan enigszins schuin op de optische as kijken. Hoe verder wij van deze as kijken, des te schuiner kijken wij op deze as en des te sterker is de dubbelbreking (fig. 71). Hierdoor zien wij steeds andere kleuren naarmate wij verder van de as kijken, en verschijnen er dus gekleurde *ringen* met de optische as als middelpunt. Ook nu zijn de kleuren het fraaist met gekruiste filters. Nu is bovendien de hoek die de as maakt met het trillingsvlak van het invallende licht, afhankelijk van de richting waarin wij kijken. Linksboven en rechtsonder in fig. 71 is deze hoek bijv. 45° , terwijl hij recht boven de as, of ter weerszijden ervan, 90° of nul is. Dit betekent dat het helderste licht (bij gekruiste filters) linksboven enz. ontstaat, terwijl er recht boven de as *niets* met het invallende licht gebeurt en het dus door gekruiste filters uitgedoofd wordt. Hierdoor ontstaat er een zwart kruis door de gekleurde cirkels heen; deze balken noemt men de *isogyren*. Bij evenwijdige filters

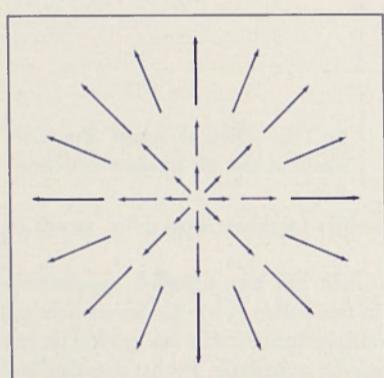


fig. 71 Projectie van de optische as als wij er bij een éénassig mineraal in kijken. Hoe verder wij van de as vandaan kijken, des te sterker is de dubbelbreking.

ziet men het tegengestelde, dus een wit kruis. Gebruikt men circulaire in plaats van lineaire filters, dan is dit kruis niet te zien en verschijnen alleen gekleurde cirkels. De verscheidenheid van de figuren die wij op deze wijze te zien kunnen krijgen is groot. Het hangt af van de gebruikte filters welk figuur er te voorschijn komt; een combinatie van een lineair en een circulair filter geeft een ander patroon (§ 67). Tweeassige mineralen leveren ingewikkelder figuren op, die weer afhangen van de hoek tussen deze assen en de stand van de filters (§ 68), terwijl een combinatie van dubbelbreking en optische activiteit tenslotte zorgt voor hoogst merkwaardige en regelmatige figuren, waarbij isogyren kunnen gaan spiraliseren (§ 69). In principe is de verklaring van de meeste van dit soort ingewikkelde figuren wel terug te voeren op het bovenstaande, maar de precieze uitwerking blijkt vaak uiterst lastig te zijn.

Men kan zich tenslotte afvragen waarom wij het hier slechts over mineralen, en niet over opgerakte plastics en dergelijke hebben, waarin toch in principe hetzelfde te zien zou moeten zijn. De reden hiervoor is, dat bij deze materialen de rek niet erg regelmatig is gebeurd, zodat de optische as zich slingert door het materiaal. Hierdoor verschijnen er bijna nooit de mooie regelmatige patronen die zo kenmerkend zijn voor mineralen.

95 Optische rotatie

Een stof die *optisch actief* is, heeft de eigenschap het polarisatievlak van doorvallend lineair licht te *roteren*. Als het licht een bepaalde afstand door zo'n materiaal heeft afgelegd kan het gebeuren dat zijn polarisatierichting bijv. 90° is gedraaid. Toch blijft het licht volledig lineair gepolariseerd en wordt er dus *geen circulair licht* gecreëerd (dit dus in tegenstelling tot dubbelbrekingsverschijnselen). De *mate* waarin de rotatie plaatsvindt blijkt zeer sterk af te hangen van de kleur van het licht - houdt men zo'n materiaal tussen twee filters, dan zien wij kleuren verschijnen. Dit is natuurlijk het gevolg van het feit dat wij nooit alle kleuren tegelijk kunnen doven met een filter, omdat iedere kleur bij zijn doorgang door het materiaal geleidelijk een andere trillingsrichting heeft gekregen.

Hoe ontstaat dit wonderlijke verschijnsel nu? Om dit te begrijpen kunnen wij weer het beste rekbare stoffen (plastics e.d.) in beschouwing nemen. Nu moeten wij ons voorstellen dat deze stof niet gerekt, maar *getordeerd* wordt; er is nu geen rekas maar een torsie (draai) als aanwezig. Lineair licht dat langs deze as beweegt 'voelt' dan ook geen rek en blijft lineair. Bij *circulair licht* is dit anders: licht dat met de torsie meedraait heeft een iets andere brekingsindex dan licht dat hier tegenin draait. Er is dus *circulaire dubbelbreking* aanwezig. Deze dubbelbreking is in het algemeen

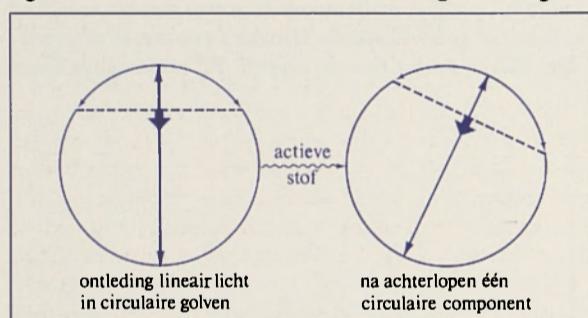


fig. 72 Optische rotatie kan verklaard worden uit circulaire dubbelbreking.

echter zo zwak, dat invallend ongepolariseerd licht nauwelijks merkbaar opgesplitst wordt in circulaire lichtbundels.

Toch is deze circulaire dubbelbreking van belang. *Lineair licht* kan men namelijk opgebouwd denken uit twee tegengestelde circulaire lichtbundels, die in fase trillen (§ 2). Als lineair licht nu door zo'n materiaal loopt, dan zullen de samenstellende circulaire lichtbundels dus geleidelijk ten opzichte van elkaar gaan lopen, juist als bij chromatische polarisatie. Bij het samenstellen van de uittredende lichtbundels (die nu een faseverschuiving ten opzichte van elkaar hebben gekregen) is het licht lineair gebleven, maar het polarisatievlak gedraaid (fig. 72).

Hoe groter de dikte d van het materiaal, des te groter zal de vertraging en dus de faseverschuiving tussen de samenstellende circulaire bundels zijn, en des te groter is dus de rotatie van het polarisatievlak. Bij dubbelbreking is deze faseverschuiving afhankelijk van het aantal golflengten dat de golven t.o.v. elkaar achter zijn gaan lopen, dus evenredig met $(n_{||} - n_{\perp}) d/\lambda$. Bij de optische rotatie is dit $(n_L - n_R) d/\lambda$. Het blijkt echter, dat het verschil in brekingsindex tussen links- en rechtsdraaiend licht $n_L - n_R$ zelf bovendien *ook* evenredig is met $1/\lambda$. Hierdoor is de faseverschuiving, en dus de rotatie, evenredig met $1/\lambda^2$ voor optische rotatie, tegen $1/\lambda$ bij dubbelbreking (waar het verschil in brekingsindex in verschillende richtingen $n_{||} - n_{\perp}$ nauwelijks kleuraf-

hankelijk is). Het gevolg is, dat de kleuren die wij bij optische rotatie zien anders zijn dan de Newtonse kleuren die bij chromatische polarisatie verschijnen, daar de menging anders is!

Optische rotatie treedt op in stoffen die een spiraalstructuur vertonen. Dit kan getordeerd plastic zijn, maar hier is het weinig uitgesproken doordat het roterend vermogen klein is en de torsies doorgaans slingert door het materiaal. Meestal zien wij hier alleen maar dubbelbrekingsverschijnselen, die de rotatie overheersen. Sommige mineralen, zoals kwarts, hebben echter een sterke inwendige spiraalstructuur. Hierbij is de optische activiteit groot en kan men het verschijnsel prachtig zien als men een plaatje hiervan neemt en loodrecht op de optische as kijkt. De spiraalstructuur kan zich echter ook op moleculair niveau bevinden; dit is bijv. het geval bij suiker en terpentijn. Deze stoffen zijn ook in opgeloste, vloeibare of zelfs gasvormige toestand actief! Dit in tegenstelling tot kwarts, waar de spiraalstructuur in de kristallijne opbouw zit en dus verdwijnt bij smelten (§ 69). Nu zijn in een oplossing (of een vloeistof of gas) de actieve moleculen weliswaar willekeurig georiënteerd, maar het totale roterend vermogen is toch in één richting, ondanks het feit dat een gedeelte van de moleculen 'omgekeerd' staat. Dit is hetzelfde als wat men ziet bij een rechtsdraaiende Schroefdraad, die altijd rechtsdraaiend blijft, ook als hij wordt omgekeerd.

Optische rotatie ziet men het zuiverst in (suiker)oplossingen, omdat er in opgeloste stoffen geen dubbelbreking optreedt en het draaiend vermogen toch gehandhaafd blijft (§ 69). Bij kristallen ziet men doorgaans ook kleurverschijnselen optreden die het gevolg zijn van dubbelbreking; slechts in de richting van de optische as treedt deze dubbelbreking niet op. De fraaiste kleuren zien wij weer als de dikte van het materiaal, of de concentratie van de oplossing, niet te groot of niet te klein is, juist zoals bij de dubbelbreking. Draait men een van de filters 90° , dan verschijnen weer de complementaire (tegengestelde) kleuren (§ 93).

Alle actieve stoffen kunnen zowel links- als rechtsdraaiend zijn, dus het polarisatievlak geleidelijk met de klok mee of er tegenin draaien. Er bestaat dus linksdraaiend en rechtsdraaiend kwarts in de natuur. Welke draaiing ze vertonen hangt af van de spiraalstructuur die het kristal of de moleculen bezitten; in principe hebben beide een even grote kans om te ontstaan. Wel is het zo dat bij kristallisatie de kans dat gelijksoortige moleculen zich aanéén hechten groter is, zodat er grote links- of rechtsdraaiende kristallen kunnen ontstaan. Maakt men nu synthetisch suiker, dan blijken er evenveel links- als rechtsdraaiende moleculen gevormd te worden, en is de totale optische activiteit nul (zie ook § 82). Levende organismen kunnen ook suiker en dergelijke produceren; hier is in de loop van de tijd slechts het vermogen om één van de twee soorten te maken overgebleven. Deze suikers, en ook andere organische materialen, vertonen dus wél optische activiteit. Een voorbeeld vormen de vleugelschilden van de *gouden tor* (§ 50), die van een metaalachting materiaal zijn opgebouwd dat sterk optisch actief is. Zulke kevers hebben een glans die linksdraaiend, circulair gepolariseerd is als gevolg van deze eigenschap. Dit is te begrijpen als men bedenkt dat de oorzaak van optische activiteit gelegen is in circulaire dubbelbreking (§ 82). Er zijn betrekkelijk weinig mineralen die optisch actief zijn. Een heel enkele (NaClO_3) is dit zelfs zonder dubbelbrekend te zijn; deze stof kristalliseert in een kubische kristalklasse. Bij dit materiaal zien wij dezelfde verschijnselen als bij suikeroplossingen. Kwarts is het meest voorkomende optisch actieve mineraal; bijna alle andere zijn zeer zeldzaam. Nu is kwarts éénassig, en daardoor is de optische rotatie alleen in de nabijheid van de optische as goed te zien. Verder hier vandaan zien wij overheersend de dubbelbrekingskleuren. Niettemin maakt juist deze combinatie het mineraal tot één van de interessantste uit de kristaloptica (§ 69).

Suikerkristallen en dergelijke vertonen eveneens optische activiteit, maar deze zijn tweedelig. Bij dit soort stoffen wordt de optische activiteit geheel overschaduwd door de dubbelbreking, zodat die niet merkbaar naar voren komt.

Bronnen van gepolariseerd licht

96 Inleiding

Hieronder verstaat men een lichaam, dat gepolariseerd licht uitzendt. In de natuur zijn sterk gepolariseerde lichtbronnen bijvoorbeeld de blauwe hemel op 90° van de zon, gereflecteerd zonlicht enzovoort. Strikt genomen is een ongepolariseerde lichtbron, voorzien van een polarisatiefilter ook zo'n bron.

De bovengenoemde bronnen van gepolariseerd licht zijn echter in oorsprong geen échte bronnen van gepolariseerd licht, aangezien hier het licht oorspronkelijk ongepolariseerd is en pas na strooiling, weerkaatsing of een ander proces gepolariseerd is. Er bestaan echter in de natuur ook enkele processen waarbij *direct* gepolariseerd licht gevormd wordt.

De hier bedoelde processen zijn meestal gebeurtenissen die zich afspelen op atomair niveau. Ze treden soms op in elektrische ontladingen, waar het licht afkomstig is van verval van aangeslagen atomen. Wij behandelen de volgende verschijnselen in vogelvlucht:

Elektrische ontladingen en het Zeeman-effect

Synchrotronstraling

Emissie van gloeiende metalen en lampen

Het derde proces is besproken in § 80; het hoort misschien niet helemaal thuis in dit lijstje. Al deze bronnen geven *lineair* licht. Sterke bronnen van *circulaire* straling treden in de natuur niet door directe vorming op.

97 Elektrische ontladingen en Zeeman-effect

Het blijkt, dat bij het oplichten van atomen door een elektrische ontlading inderdaad polarisatie van het uitgezonden licht kan optreden. Dit is echter alleen het geval, als de atmosferische druk zeer gering is: kleiner dan ongeveer één miljoenste atmosfeer. Onder aardse omstandigheden treedt dit dus niet op: vonken, TL-ontladingen, bliksems en dergelijke zijn dus ongepolariseerd. De polarisatie van TL-licht bestaat slechts bij de gratie van het feit dat dit licht gebroken wordt door de glazen wand waarachter deze ontlading plaats vindt (§ 64). Ook vlammen zijn niet gepolariseerd.

Anders is het gesteld met het *poollicht*, dat op zulke grote hoogten in de atmosfeer verschijnt dat de omstandigheden wél gunstig zijn voor het optreden van polarisatie. Het blijkt nu, dat slechts sommige 'lijnen' hiervan (dus bepaalde kleuren van het licht) polarisatie kunnen vertonen. Het hoge, rode poollicht, dat bijna monochromatisch is, is hiervan een voorbeeld en kan een polarisatietaak van wel 60% hebben, mits men ver van het magnetische noorden af kijkt. De richting

van deze polarisatie is O-W. Het lagere, groene of witachtige poollicht vertoont deze polarisatie niet, hetgeen voortkomt uit de aard van de atomaire overgangen die verantwoordelijk zijn voor dit licht (§ 59).

Poollicht kan men opvatten als een elektrische ontlading, die plaats vindt in het (aard)magneetveld. De polarisatie die hierbij optreedt hangt nauw samen met het *Zeeman-effect*, waarbij lijnen in een magneetveld worden opgesplitst in tegengesteld gepolariseerde lijnen. Dit Zeeman-effect treedt verder niet op in zijn zuivere vorm in de straling om ons heen.

98 Synchrotronstraling

Deze straling ontstaat als zeer snelle elektronen zich in een magneetveld bevinden. Zij beschrijven dan spiraalvormige banen en zenden hierbij een blauwachtig wit licht uit dat sterk lineair gepolariseerd is. De polarisatierichting is loodrecht op het magneetveld (fig. 73). Deze straling gaat gepaard met een intense radiostraling, die op dezelfde wijze gepolariseerd is.

Synchrotronstraling komt onder aardse omstandigheden niet voor; zij kan wel worden opgewekt in laboratoria. In de wereldruimte blijken er echter wel een aantal lichtbronnen te zijn die deze straling in het zichtbare gebied uitzenden. De beroemdste objecten van deze aard zijn de *Krabnevel M1* in de Stier en de 'jet' die uit het elliptische melkwegstelsel *M87* in de Maagd komt.

Het waarnemen van deze objecten vereist een behoorlijke kijker. De richting van polarisatie blijkt dan van plaats tot plaats te verschillen; zij hangt af van het magneetveld ter plaatse. Nabij de rand van de Krabnevel is de polarisatieraad 70%, dit moet met een telescoop te zien zijn (§ 58). De polarisatie van de jet in *M87* is veel geringer; het waarnemen ervan vereist een uiterst professionele apparatuur, zodat dit ver buiten het bereik van een amateur ligt.

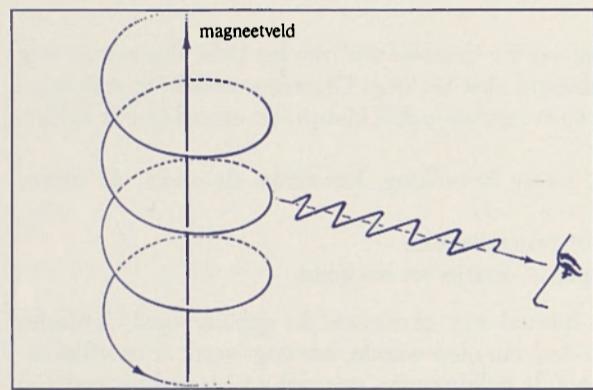


fig. 73 Een elektron beschrijft in een magneetveld spiraalvormige banen. Als de snelheid hoog genoeg is, zendt het hierbij licht uit dat loodrecht ten opzichte van het veld gepolariseerd is.

Slot en overzicht

99 Gepolariseerd licht in de natuur: een fysisch overzicht

Polarisatie van het licht om ons heen is zeer algemeen en vaak in sterke mate aanwezig. In tegenstelling tot bij kleuren is het menselijk oog echter nauwelijks in staat de polarisatie van licht op te merken, zodat de natuur voor ons in dit opzicht flets blijft. Dit verandert evenwel als men een polarisatiefilter voor het oog houdt en aldus het vermogen verkrijgt gepolariseerd licht als zodanig te herkennen: men ziet dan lichteffecten optreden die zonder het filter verborgen blijven. De sterke mate waarin polarisatie vaak optreedt zorgt er dan voor dat zo'n eenvoudig en eigenlijk ongevoelig hulpmiddel als een simpel polarisatiefilter inderdaad voldoende is om de natuur een ander uiterlijk te geven.

De polarisatie die optreedt hangt af van de 'geschiedenis' van het licht, dus van de weg die het heeft afgelegd vanaf de lichtbron naar het oog. Om een overzicht te verkrijgen kan men het licht in de natuur het beste indelen in drie klassen, die een aflopende helderheid weergeven:

1. Directe lichtbronnen (de zon, zware bewolking, kunstlicht, de maan, de sterren enzovoort);
2. Licht dat ons via één voorwerp of deeltje bereikt;
3. Licht dat via meerdere voorwerpen of deeltjes tot ons komt.

De *lichtbronnen* in de natuur zijn meestal niet of nauwelijks gepolariseerd. 's Nachts vormen zij het meest kenmerkende deel van onze wereld; ons oog wordt er onwillekeurig heengetrokken. Overdag kunnen de lichtbronnen evenwel zo oogverblindend zijn dat men zich wel wacht er in te kijken, zodat ze niet meer het markantste deel van de wereld hoeven te vormen: deze rol wordt overgenomen door de verlichte voorwerpen om ons heen.

Licht dat ons oog via één voorwerp bereikt bepaalt overdag het uiterlijk om ons heen; het is op de directe lichtbronnen na het helderste licht in de natuur. Op zijn weg via zo'n voorwerp wordt het oorspronkelijk ongepolariseerde licht van de bron nu gedeeltelijk omgezet in gepolariseerd licht, dat in principe altijd *lineair* is. Kenmerkend voor het licht dat via één voorwerp tot ons komt is dat het zijn oorsprong nog niet 'vergeten' is. Hierdoor is de polarisatie symmetrisch ten opzichte van de lichtbron, hetgeen betekent dat enerzijds de polarisatierichting of radieel of tangentieel ten opzichte van de lichtbron moet zijn, en anderzijds dat de sterkte van de polarisatie slechts kan afhangen van de

(hoek)afstand tot de lichtbron. Deze symmetrie wordt slechts geweld aangedaan als het voorwerp zelf een zeer sterke anisotropie in samenstelling of in oriëntatie vertoont; dit kan dan leiden tot een afwijkende polarisatierichting of zelfs in een enkel geval tot de vorming van circulair licht.

Verreweg het meeste licht om ons heen ontstaat door strooing aan kleine deeltjes of weerkaatsing aan ruwe of gladde oppervlakken. Dit leidt tot *tangentiële* polarisatie; dit is dus de overwegende polarisatie in de natuur. *Radieel* licht blijft in de natuur beperkt tot die enkele, geïsoleerde lichtverschijnselen waar niet een weerkaatsing, maar een breking, dubbelbreking of oppervlaktegolven de wezenlijke rol speelt bij de vorming.

Licht dat via meerdere deeltjes of voorwerpen het oog bereikt is nog meer afgezwakt. Dit licht is door alle kaatsingen en dergelijke die het op zijn weg van de lichtbron naar ons toe heeft ondergaan bovendien zijn oorsprong 'vergeten', en zijn polarisatie zal dus geen symmetrie meer behoeven te vertonen ten opzichte van de oorspronkelijke lichtbron. Na passage van de verschillende voorwerpen kan het van oorsprong ongepolariseerde licht nu zowel in lineair als in circulair licht getransformeerd zijn, waarbij de sterkte van de polarisatie, de trillingsrichting van het lineaire deel en de draaizin van het circulaire deel, afhankelijk van de afgelegde weg, steeds verschillend kan zijn. Het is deze bijdrage van het licht in onze wereld die verantwoordelijk is voor bijna al het circulaire licht in de natuur en waarbij ook een sterke kleurafhankelijkheid van polarisatie te voorschijn kan komen. Deze bijdrage is het sterkst bij schemer, als de lichtbron zelf al gepolariseerd is (de blauwe hemel), maar onder normale omstandigheden is hij vergeleken met het licht dat slechts via één deeltje of voorwerp tot ons komt zó gering, dat het nauwelijks in staat is het globale symmetrische polarisatiebeeld van de wereld aan te tasten. Het voegt dan slechts een aantal nieuwe mogelijkheden aan de reeds optredende polarisatie toe.

Literatuur

1 Algemene literatuur

- M. Minnaert, *De natuurkunde van het vrije veld I*, Thieme, Zutphen 1968 (optica van het veld)
 S. W. Visser, *Optische verschijnselen aan de hemel*, KNMI, Verspreide opstellen 3, 1957; in F. Linke,
 F. Möller, *Handbuch der Geophysik Bd VIII*, Börntrager, Berlin 1940 (atmosferische optica)
 T. Gehrels, *Planets, Stars and Nebulae studied with Photopolarimetry*, University of Arizona 1974
 (polarisatie van astronomische en andere objecten)
 R. W. Wood, *Physical optics*, McMillan Co, New York 1947 (optica en polarisatie)
 R. W. Ditchburn, *Light*, Blackie and Son Ltd, London/Glasgow 1963 (optica en polarisatie)
 A. C. S. van Heel, *Inleiding in de optica, hoofdstuk 8*, Nijhoff, Den Haag 1964 (polarisatie)
 B. G. Escher, *Algemene mineralogie en kristallografie*, Noorduyn, Gorinchem 1954 (optische mineralogie)
 G. N. Ramachandran, S. Ramaseshan, *Crystal Optics in Handbuch der Physik Vol 25*, Ed. S. Flügge,
 Springer, Berlin 1961 (optische mineralogie)
 R. A. R. Tricker, *Introduction to Meteorological Optics*, Elsevier, New York, Mills and Boon,
 London 1970 (atmosferische optica)
 W. A. Shurcliff, *Polarized Light, production and use*, Harvard University Press, Cambridge 1966
 (polarisatie)
 W. A. Shurcliff, S. S. Ballard, *Polarized Light*, van Nostrand, London, 1964 (polarisatie)

2 Sleutelliteratuur bij de paragrafen. Bij verwijzing naar de algemene literatuur is volstaan met vermelding van de schrijver en de pagina, ook als het betreffende deel door een ander is geschreven.

par.

- 6 K. von Frisch, *Experientia Vol V/4* (1949) 142, Gehrels p. 472, R. Wehner *Sc. Am.* **235** (1978)
 106 (dieren); D. M. Summers e.a. *J. Opt. Soc. Am.* **60** 1970 (Haidinger); Minnaert p. 472
 (gezichtsbedrog); W. A. Shurcliff *J. Opt. Soc. Am.* **45** (1955) 399 (Haidinger in circulair
 licht)
 12 Gehrels, p. 444 (blauwe lucht); J. Walker *Sc. Am.* **238** (1978) 132 (Vikingen)
 14 Gehrels, p. 27, N. Divari *Izv. Atm. Oc. Phys.* **3** (1967) 289 (neg. pol.); G. V. Rozenberg,
Twilight, Plenum Press, New York 1966 (schemering)
 17 R. Tousey e.a., *J. Opt. Soc. Am.* **43** (1953) 177 (sterren overdag)
 19 G. E. Shaw, *Appl. Opt.* **14** (1975) 388, S. D. Gedzelman, *Appl. Opt.* **14** (1975) 2831 (hemel
 tijdens verd.); J. Pasachoff, *Sc. Am.* **229** (1973) 68 (corona)
 20 Gehrels, p. 518 (wolken)
 24 Minnaert, p. 387 (citaat)
 25 Gehrels, p. 514, B. Fogle e.a., *Space Sc. Rev.* **6** (1966) 270 (lichtende nachtwolken);
 Minnaert, p. 266, J. Hallet e.a., *Weather* **22** (1967) 56 (parelmoerwolken)

- 27 C. M. Botley, *Weather* 32 (1970) 287 (eclipsboog)
29 Minnaert, p. 219 (gesp. dauwboog), K. Lenggenhager *Z. f. Met.* 26 (1976) 112 (spiegelboog)
31 G. P. Können e.a., *Appl. Opt.* 18 (1979) 1961 (overt. mistbogen)
32 S. Rösch, *Appl. Opt.* 7 (1968) 233 (13e regenboog)
- 36 G. P. Können, *Weather* 32 (1977) 467 (dubbelbreking halo's); K. Lenggenhager, *Met. Runsch.* 25 (1972) 41 (benedenbijzonen onderzon); Visser in Handbuch p. 1069 (pol. kleine kring)
40 Minnaert, p. 255 (dubbele halo)
41 A. Cornu, *Comt. Rend. Ac. Paris* 108 (1889) 429 (NaNO_3 halo)
42 H. C. van de Hulst, *Light Scattering by small Particles*, Wiley, New York 1955 (glorie), Tricker p. 206 (ongep. glorie)
43 C. M. Botley, *Weather* 32 (1970) 287 (eclipskrans) Minnaert p. 262 (ir. wolken); Tricker, p. 24 en 146 (kransen en heiligenlicht)
44 Gehrels, p. 384 (Umov eff.)
60 Gehrels, p. 495, G. Robinson, *Mol. Cr.* 1 (1966) 467 (kevers)
55 Minnaert, p. 364 (diepzee)
56 A. Ivanov, in Jerlov en Nielsen, *Optical aspects of oceanography*, Ac. Press New York/London 1974 (pol. onder water); Gehrels, p. 434 (circ. pol.)
58 Gehrels, p. 891 (sterren); p. 581 en 381 (planeten en maan); p. 814 (kometen); p. 371 (kunstmanen); p. 834 (VY CMa); p. 1014 (M1)
59 R. A. Duncan, *Planet. Sp. Sc.* 1 (1959) 112, J. W. Chamberlain, *The Physics of the Aurora and Airglow*, Ac. Press New York/London 1961, p. 205 (poollicht)
60 J. W. Chamberlain, *The Physics of the Aurora and Airglow*, Ac. Press, New York/London 1961, p. 508, Gehrels, p. 780 (ionosfeerlicht); Gehrels, p. 781 (zodiak. licht); p. 794 (Gegenschein)
62 Wood, p. 783, O. Sandus, *Appl. Opt.* 4 (1965) 1634 (em. pol.); A. Pflüger, *Ann. d. Phys.* 7 (1902) 806 (toermalijn)

Alfabetisch register

De vette cijfers in dit register verwijzen naar de pagina, waarop het desbetreffende onderwerp apart wordt behandeld.

A

Aarde, de -^v, 93
Ademwolk 65
Airglow, zie ionosfeerlicht
Algen 25
Altocumulus 36, 41
Aluin 64
Anhydriet 110
Anisotroop 16, 126
Aragoniet 109
Arago 24
Arapunt 24, 34, 42
Asbak 79
Asfalt 36, 70, 72
Asgrauwe licht 93
Auto 74
Autobanden 75
Autodaken 36
Autoruiten 36, 81

B

Babinet 24
Babinetpunt 24, 35
Bakstenen 71, 72, 74
Band van Alexander 47
Belichting, alzijdig 30
Belichting, éénzijdig 30
Belichting, indirecte -, 71
Benedenbijzon 63
Benedenraakboog 56
Bergen 38, 73
Beslagen ruiten 64, 67
Beth 25
Beton 71, 72, 81
Bijen 18, 25, 33
Bijmaan 55, 92
Bijregenboog, zie nevenregenboog
Bijtegenzon 55, 64
Bijzon 55, 61
Biot 24
Bladeren 70, 77
Blauwe hemel, zie hemellicht
Bliksem 99

Bloemen 77

Bloemsput 46, 51
Bloe oog 18
Bot 77
Bovenraakboog 55
Branding 87, 98
Breking 118, 123, 134
Brekingsindex 16, 121
Brewster 24
Brewster hock 120, 130
Brewsterpunt 35
Bricard 25
Brookiet 110
Bui 46
Buizing 46, 67
Bundels van Brewster 19, 24, 113
Bundels van Haidinger 18, 24, 35

C

Calciet, dubbelbreking van -, 24, 81, 126
Calciet, interferentiefiguren in -, 107
Cellofaan 84
Chemiluminicentielicht 99
Chromatische polarisatie 81, 106, 136
Chroom 75, 134
Circular dichroisme 125
Circularaire dubbelbreking 140
Circular filter 20, 103
Circular licht 13
Circular licht in de natuur 29, 50, 75, 77, 79,
 82, 89, 142, 145
Circumzenitale boog 55, 62
Cirrus 55
Complemantaire kleuren 106
Cordieriet 24, 33, 113
Corona 24, 39, 94
Cumulonimbus 42, 46
Cumulus 43

D

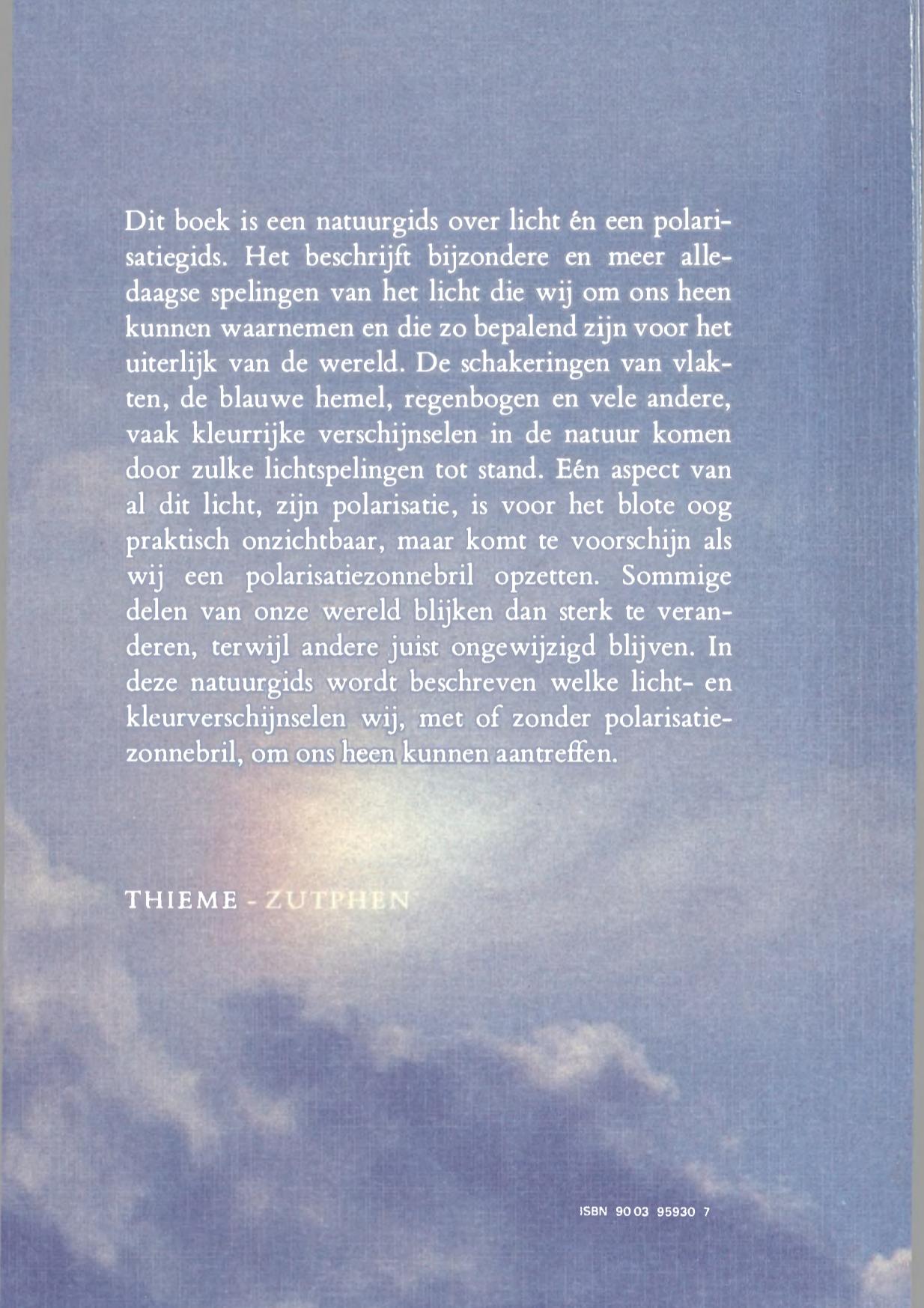
Dauwboog 46
Dauwboog, gespiegelde -, 51
Deining 86

- Depolarisatie 132
 Dertiende regenboog 54
 Diademontage 84
 Diamant 78, 133
 Dichroisme 24, 113, 127
 Dieren 77
 Digitaal horloge 103
 Dombrovski 25
 Doucheel 46, 53, 65
 Draaizin 13
 Draaizin, na weerkaatsing 133, 134
 Draaizin, omkering van - 132, 134
 Dronkenmansglas 81
 Dubbelbreking 24, 59, 84, 106, 126, 134
 Duncan 25
 Dunne bewolking 33, 41, 43
 Dwaallichtjes 91
- E**
 Eclipskrans 67
 Eclipsregenboog 47
 Ecliptica 96
 Elektrische ontladingen 142
 Elliptisch licht 13
 Emissiepolarisatie 124
 Epidoot 113
 Erasmus Bartolinus 24
 Evenwijdige filters 20
- F**
 Faraday 24
 Faradayrotatie 24
 Fasesprong 130, 133
 Filters 19
 Fontein 46
 Fresnel 24
 Front 43, 46
 Fruitvliegjes 18
- G**
 Gegenschein 96
 Gekruiste filters 20
 Gele vlek 18
 Geschiedenis 24
 Gespiegelde regenboog 50
 Geyser 46
 Gezichtsbedrog 19
 Gips 70
 Gips, interferentiefiguren in - 110
 Gladheid 73
 Glans 20, 69, 70, 74, 77, 78, 86, 120
 Glas, heetgestookt - 99
 Glasplaatjes 22, 24
 Glaucofaan 113
 Glazen voorwerp 78
 Glimwormmpjes 99
 Glorie 25, 53, 65, 67
 Golven 86
 Goud 122
 Gouden tor 77
 Gras 67, 70, 71
- Grint 71, 74
 Grote kring 55, 62
- H**
 Haar 77
 Hagelstenen 84
 Haidinger 24
 Halfbewolkte lucht 36, 41
 Hall 25
 Haloklassen 55
 Halo's 24, 55, 81
 Halo's, afwijkende 63
 Halo's, kunstmatige 25, 64
 Halo's, lusvormige -, 56
 Halo's, polarisatie 59
 Heiige lucht 34, 74
 Heiligenschijn 66
 Hemel, bij maanlicht 38, 92
 Hemellicht 24, 32, 81
 Hemellicht, weerspiegeling van 35, 73, 75, 86
 Heraphat 24
 Hiltner 25
 Hogere regenboog 54
 Hoofdazimuth 134
 Hoofdinvalshoek 122, 134
 Hoofdrengenoog 46
 Horizontaal filter 22
 Horizontaal licht 15
 Horlogeplaat 103
 Hout 74
 Huid 77
 Huizen 73, 78
 Huygens 24, 127
- I**
 Idiofanische ringen 113
 Inkt 74
 Insektenvleugels 77
 Interferentie 53, 67
 Interferentie van gepolariseerd licht, zie
 chromatische polarisatie
 Invalshoek 118
 Ionosfeerlicht 96
 Iriserende wolken 44, 66
 Isogyren 108, 139
 Isotroop 126
- J**
 Jaffe 25
 Junikever 77
 Jupiter 38, 67, 93
- K**
 Kevers 25, 77
 Kiessling 25
 Kirchhoff 25
 Kleine kring 55, 61
 Kleur 12, 29, 69
 Kleurschifting 45, 79, 88
 Komeet 24, 94

- Krabnevel 25, 94
 Krans 66, 92, 137
 Kring 55
 Kristalklassen 106
 Kristaloptica 106, 139
 Kritische opalescentie 120
 Kroonluchter 79
 Kunstmaan 94
 Kwantlambda-plaatje 20, 137
 Kwarts, bijzon in -, 61
 Kwarts, dubbelbreking van -, 81
 Kwarts, interferentiefiguren in -, 111
 Kwarts, optische activiteit van -, 24, 111, 141
- L**
 Lak 75
 Lampen 102
 Land 25
 Lava 99
 Laveren 23
 Le Grand 25
 Liais 24
 Lichtende cijfertjes 103
 Lichtende nachtwolken 25, 43
 Lichtende planten 98
 Lichtende zee 98
 Lichtend hout 98
 Lichtgolf 11, 15
 Lichtselheid 16, 121
 Lineair filter 19
 Lineair licht 13
 Linksdraaiend filter 20
 Linksdraaiend licht 13
 Luchtspiegelingen 72, 124
- M**
 Maan 24, 38, 93
 Maan, belichting door -, 30, 38, 91
 Maanhalo's 55
 Maanregenboog 46, 92
 Maanreizigers 67
 Maansverduistering 91, 93
 Malus 24
 Mars 93
 Matglas 73
 Mechanische spanningen 81, 83
 Meervoudige strooing 35, 129
 Mechanisch koppel 25
 Meikever 77
 Melk 120
 Melkweg 98
 Mensen 77
 Mercurius 94
 Mestkever 78
 Metaalglaas, actieve -, 125
 Metalen, breking aan -, 124
 Metalen, dichroïc 128
 Metalen, gloeiende 24, 99, 124
 Metalen, weerkaatsing op -, 21, 50, 74, 75, 122, 133
 Michelson 25
- Mieren 18, 33
 Mineralen, éénassige -, 107
 Mineralen, tweecassige -, 109
 Mist 33, 41, 43, 53, 65, 67
 Mistboog 51, 66
 Modder 71
 Modificatieketen 29
 Mutant 78
 M1 94
 M87 143
- N**
 Naaldjes 128
 NaClO_3 141
 Nagels 77
 NaNO_3 25, 64, 127
 Natuurlijk licht 11
 Navigeren 33, 65
 Negatieve polarisatie 14, 34, 40, 42, 87, 89
 Neutraal punt 24, 34, 42, 71, 87, 89
 Nevel 65
 Nevenregenboog 46
 Newtonse kleuren 137
 Nicol 24
 Noorderlicht, zie poollicht
- O**
 Oceaan 87
 Ogen 77
 Olievlek 137
 Onder water 25, 88
 Onderzon 63
 Ongepolariseerd licht 11, 118
 Oppervlaktegolven 125
 Oppositielicht, zie Gegenschein
 Optisch drieassig 127
 Optische activiteit 24, 110, 125, 134, 140
 Optische as 61, 107, 127
 Optisch éénassig 127
 Optische rotatie, zie optische activiteit
 Optische verschijnselen 45
 Optisch tweeeassig 127
 Overtallige mistbogen 25, 53
 Overtallige regenboog 46
- P**
 Papier 73
 Parallelle filters 20
 Parelmoeerwolken 43
 Parhelische ring 55, 64
 Planeten 38, 93
 Planten 77
 Plastic 84
 Plastic zakjes 84
 Platina 99, 124
 Pleochroisme 113, 128
 Polarisatie, circulair 12
 Polarisatie, elliptisch 13
 Polarisatie, gedeeltelijke -, 14, 131
 Polarisatie, lineair 11
 Polarisatie, negatieve -, zie negatieve polarisatie

- Polarisatieblind 11, 84
 Polarisatiecontrasten 36, 38, 42, 63
 Polarisatiefilters 19, 113, 127
 Polarisatiegraad 14, 22
 Polarisatierichting 15
 Polarisatievlak 11
 Polarisatievlak, draaiing van -, 75, 111, 130, 134, 136, 140
 Polarisatievlak, spiegeling van -, 75, 130, 134
 Polariscoop 20
 Polaroid 19
 Polaroidzonnenbril 19, 72, 78, 81, 120
 Poollicht 25, 94
 Projector 102
- R**
- Raakboog 55, 61
 Raam, verlicht -, 102
 Radargolven 12
 Radieel filter 22
 Radieel licht 15
 Radiogolven 12, 143
 Rayleighstrooing 119
 Rechtsdraaiend filter 20
 Rechtsdraaiend licht 13
 Reflectie, zie weerkaatsing
 Reflectiehalo's 63
 Regel van Umov 25, 70, 73, 122
 Regen 43, 50
 Regenboog 24, 41, 46, 54, 80
 Regenboog, abnormale -, 50
 Regenboog, weerspiegeling van -, 50
 Regendruppel 46, 80
 Rekas 126, 140
 Rivierkreeftjes 18
 Rode regenboog 46
 Röntgenstralen 12
 Rook 38, 42
 Rozenkevertje 77
 Ruimtevaarders 32, 63, 67
 Ruit 78
 Ruit, beslagen -, 64, 67
 Ruit, dubbele -, 79
 Ruit, verstevigde -, 83
 Ruit, waarnemen door -, 22
 Rutiel 79, 124, 127
 Ruwe oppervlakten 74, 122, 132
- S**
- Saturnus 93
 Scarabaeidae 77
 Schaduw 65, 67, 71, 72
 Schemering 34
 Schemering, belichting tijdens -, 30, 34, 42, 70, 71, 79, 87
 Schijnwerper 102
 Selectieve absorptie 127
 Shurcliff 25
 Sint Elmusvuur 99
 Sirius 38
 Sneeuw 43
- Sneeuwvlakte 70
 Spiegel 76, 134
 Spiegelboog 50
 Spinrag 46
 Spiraal van Airy 111
 Staal 99, 122
 Stadslicht, gloed van -, 102
 Stenen 73
 Sterke polarisatie 15
 Sterren 25, 38, 39, 93, 128
 Stofwolk 42
 Straatlantaarn 73, 102
 Stratocumulus 43
 Stratus 43
 Strooihoek 118
 Strooiling 118, 123, 129
 Suikeroplossingen 110, 125
 Symmetrieregels 144
 Synchrotronstraling 143
- T**
- Tangentiel filter 22
 Tangentiel licht 15
 Tegenpunt 45
 Terpentijn 24, 141
 Theekopje 65
 Thomsonstrooiling 119
 TL-buizen 102
 Toermalijn 24, 127
 Toermalijn, gloeiend 25, 99
 Toermalijn, interferentiefiguren in -, 113
 Torren, zie kevers
 Torsicas 140
 Totale reflectie 121, 125, 133
 Transversale golf 16
 Trein, waarneming vanuit -, 36
 Treinramen 83
 Trihoisme 113, 127
 Trillingsdiagram 12
 Trillingsvlak, zie polarisatievlak
 Tuinsproeier 46
 TV-schermen 102
- U**
- Ultraviolet licht 33
 Umov 25
 Umovingeffect, zie regel van Umov
- V**
- Van de Hulst 25
 Vectorontbinding 23
 Venus 38, 67, 94
 Veren 77
 Verticaal filter 22
 Verticaal licht 15
 Vertweelingd 107
 Vikingen 24, 33
 Vissen 18
 Vlakten 70
 Vlakten, natte -, 71
 Vlekken, zie autoruiten

- Vlieger 38
 Vliegtuig 38
 Vliegtuig, waarneming vanuit -, 32, 56, 63, 65, 98
 Vliegtuigramen 83
 Vlinders 77
 Vloeibare kristallen 125
 Vogels 38, 77
 Vonken 99
 Von Frisch 25
 Voorwerpen, gloeiende -, 99
 Voorwerpen, hoekige -, 80
 Voorwerpen, ronde -, 80
 Voorwerpen, verre -, 41, 74
 Vuur 99
 Vuurstenen 99
 Vuurvliegjes 98
 VY CMa 94
- W**
 Waas 74
 Waterval 46
 Watervlakte 86
 Watervlooien 18
 Waterwolken 36, 41, 53
 Weerkaatsing 20, 118, 123
 Weerkaatsing, inwendige -, 121
 Weerkaatsing, uitwendige -, 120
 Weerkaatsing, van circulair licht 132, 134
 Weerkaatsing, van lineair licht 130, 134
 Wegen 72, 81
 Wegen, natte -, 72
 Wegen, 's nachts 73, 102
 Wegmarkering 72
 Wet van Brewster 24, 120
 Wet van Malus 24
 Wet van Rayleigh 119
 Wet van Snellius 120
 Witt 25
- Wolftaam 103
 Wolken 38, 41, 65, 82
 Wolken, verkleuring 41
 Wolkenboog 41, 51
 Wright 25
- IJ**
 Ijsbloemen 84
 Ijskristal 56
 Ijskristal, dubbelbreking van -, 59, 84
 Ijskristal, oriëntatie 58
 Ijsschilers 84
 Ijswolken 38, 41, 53
 Ijzel 72
 Ijzer 99, 124
- Z**
 Zandvlakte 70, 81, 132
 Zandwolk 38, 42
 Zee 86, 98
 Zeegang 86
 Zeeman-effect 142
 Zeewater, regenboog in -, 46
 Zeilboot 23
 Zenit 34
 Zicht 74
 Zilver 99, 122, 124
 Zodiakale licht 25, 96
 Zon 93, 124
 Zon, belichting door -, 30
 Zon, onder water 88
 Zonnebril, zie polaroidzonnebril
 Zonnebrilglazen, metaalachtige -, 122
 Zonnestenen 33
 Zonsverduistering 39, 47, 67
 Zuil 55, 64
 Zwakke polarisatie 15
 Zware bewolking 30, 43, 71



Dit boek is een natuurgids over licht én een polarisatiegids. Het beschrijft bijzondere en meer alledaagse spelingen van het licht die wij om ons heen kunnen waarnemen en die zo bepalend zijn voor het uiterlijk van de wereld. De schakeringen van vlakten, de blauwe hemel, regenbogen en vele andere, vaak kleurrijke verschijnselen in de natuur komen door zulke lichtspelingen tot stand. Eén aspect van al dit licht, zijn polarisatie, is voor het blote oog praktisch onzichtbaar, maar komt te voorschijn als wij een polarisatiezonnenbril opzetten. Sommige delen van onze wereld blijken dan sterk te veranderen, terwijl andere juist ongewijzigd blijven. In deze natuurgids wordt beschreven welke licht- en kleurverschijnselen wij, met of zonder polarisatiezonnenbril, om ons heen kunnen aantreffen.

THIEME - ZUTPHEN

ISBN 90 03 95930 7