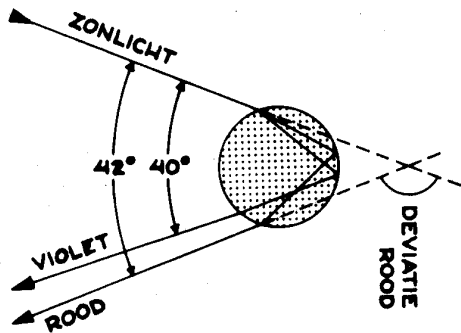
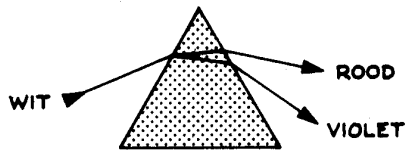


De kleuren van de regenboog

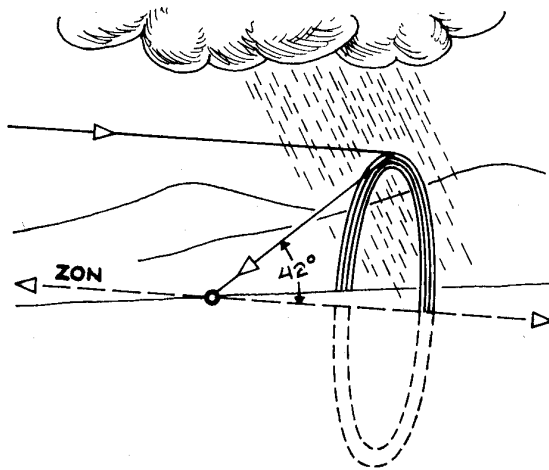
KEES FLOOR, *PLON, Utrecht*

Regenbogen volgen in de school¹ en leerboeken² natuurkunde, die er aandacht aan besteden, meestal direkt op prisma's. Het verschijnsel kleurschifting, dat een prisma geschikt maakt voor het ontwerpen van een spektrum, laat zich aan regenbogen uitstekend illustreren. Zo ontstaat de indruk dat

regendruppels en prisma's een zelfde spektrum van de zon opleveren en dat in een regenboog spektrale kleuren zichtbaar zijn³ (figuur 1). Hieronder wordt aangetoond dat dat niet juist is. Daarbij zullen verschillende factoren die het ontstaan van niet-spektrale kleuren veroorzaken, worden besproken.



Figuur 1 Kleurschifting bij een prisma (a) en bij een bolvormige regendruppel (b)



Figuur 2 Regenbogen zijn zichtbaar als zonlicht op regendruppels valt en de waarnemer met de rug naar de zon staat.

Regenbogen

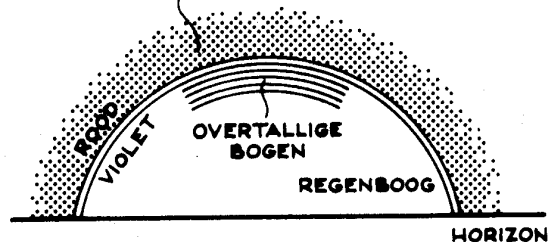
Regenbogen⁴⁻¹⁰ ontstaan als er zonlicht valt op regendruppels (figuur 2). Een waarnemer met de rug naar de zon ziet dan aan de hemel dikwijls een kleurrijke boog of een gedeelte daarvan. Vaak wordt

hiervoor de volgende verklaring gegeven. Figuur 1b geeft de stralengang door een bolvormige druppel. Linksboven valt het zonlicht in. Een deel wordt teruggekaatst (niet afgebeeld); de rest wordt gebroken. Hierbij wordt het witte licht ontleed in de kleuren van het spektrum. Violet wordt het sterkst gebroken, rood het minst. Aan de rechterkant van de druppel wordt iedere kleur weer gedeeltelijk teruggekaatst; de rest van het licht verlaat de druppel (niet afgebeeld). Linksonder wordt iedere kleur voor een deel nogmaals teruggekaatst (niet afgebeeld). De rest wordt voor de tweede maal gebroken alvorens uit te treden. Hierbij wordt het effect van de kleurschifting nog versterkt, evenals dat bij een prisma het geval is (figuur 1a). De op de regendruppel invallende lichtstraal ondergaat in totaal een richtingverandering van 138° of meer; de deviatie is 138° voor rood en 140° voor violet. Een regenboog is de som van de effecten die alle druppels afzonderlijk veroorzaken.

Bezwaren

Als de bovenstaande verklaring juist en volledig was, zouden in regenbogen spektrale kleuren zichtbaar zijn. Het zonlicht dat een druppel binnentreedt op een andere plaats dan in figuur 1b aangegeven, werd echter niet in de beschouwingen betrokken.

DONKER GEBIED



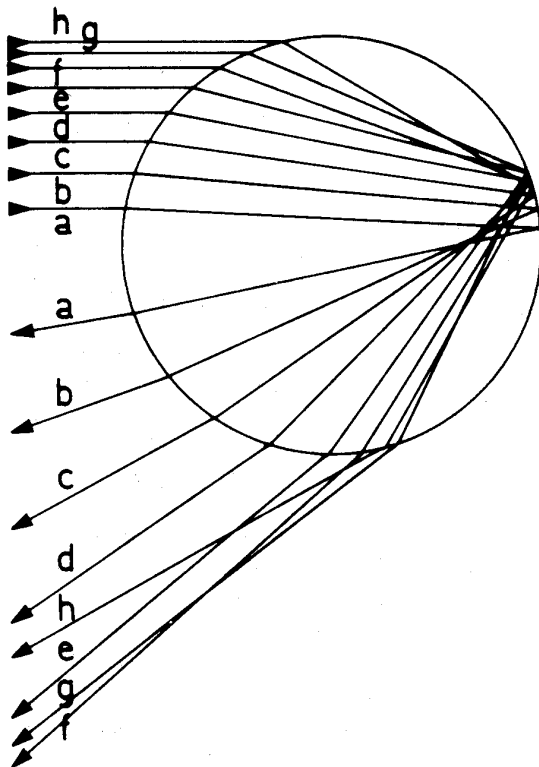
Figuur 3 Schematische voorstelling van het regenboogverschijnsel. De waarnemer staat met de rug naar de zon. Binnen de boog zijn, direkt aansluitend aan het violet, soms 'overtallige bogen' zichtbaar, meestal in rose, groene en violette tinten. Binnen de boog is de hemel lichter dan daarbuiten. Omgekeerd kan men ook spreken van een donker gebied buiten de hoofdboog.

ken. Evenmin werden de konsekventies van de gegeven verklaring getoetst aan bestaande beschrijvingen van waargenomen regenbogen. Uit die beschrijvingen blijkt onder meer dat de deviatie van de rode buitenrand niet konstant is. Ook de waargenomen breedte van de boog varieert. Verder zijn de verschillende kleuren niet altijd in dezelfde mate vertegenwoordigd. Tenslotte zijn er de z.g. overtalige bogen (figuur 3), kleurherhalingen aan de binnenzijde van de boog, meestal in rose, groene en violette tinten. De gegeven verklaring laat al deze details niet toe; hij vereist een konstante deviatie van de rode buitenrand, een konstante breedte (deviatie violet - deviatie rood) en eenzelfde inbreng van de verschillende kleuren in elke boog. Overtalige bogen kunnen niet optreden.

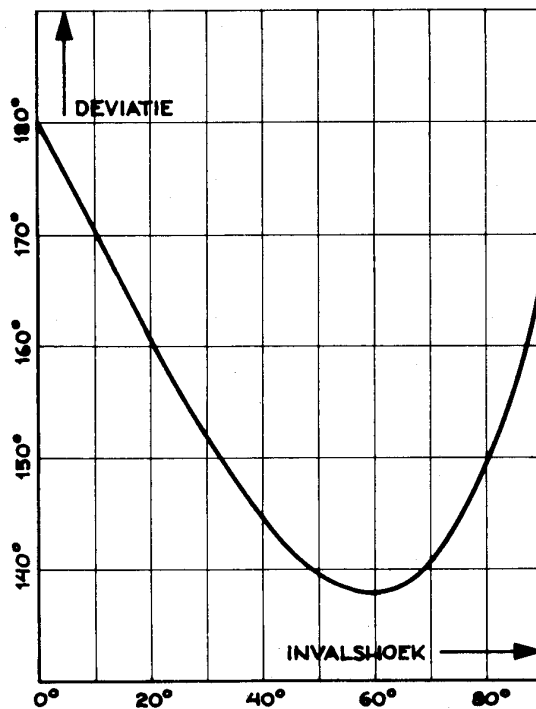
Regenbogen en geometrische optica

We gaan nu eerst na welke veranderingen er optreden als we alle lichtstralen die op een regendruppel invallen in de beschouwingen betrekken (figuur 4). Lichtstralen die door het midden van de regendruppel gaan hebben een invalshoek van 0° ; voor lichtstralen die raken aan de druppel is $i = 90^\circ$.

Figuur 5 geeft het verband tussen de deviatie en de hoek van inval. In de figuur is duidelijk te zien dat de in figuur 1b opgegeven deviatie eigenlijk een minimumdeviatie is. Voor lichtstralen die de regendruppel treffen op een ander punt dan in figuur 1b aangegeven is de deviatie groter. Omdat veel licht ongeveer volgens het minimum wordt afgebogen zijn de grootste lichtsterktes gekoppeld aan de minimumdeviatie. De regenboog vormt eigenlijk de begren-

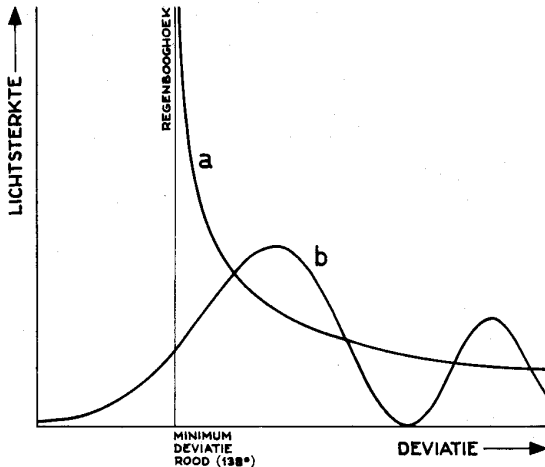


Figuur 4 Stralengang van lichtstralen, die invallen op een bolvormige regendruppel en één inwendige terugkaatsing ondergaan.



Figuur 5 Verband tussen de deviatie en de hoek van inval voor stralengangen zoals weergegeven in figuur 4.

zing van een gebied aan de hemel waaruit licht afkomstig is dat een stralengang heeft doorlopen met één inwendige terugkaatsing, net als de z.g. 'regenboogstraal' uit figuur 1b. Daardoor is de hemel binnen de boog lichter dan de hemel daarbuiten (zie figuur 6). De enige spektrale kleur die we zo nog kunnen verwachten is het rood. De andere kleuren bevinden zich op een plaats aan de hemel waarvandaan ook nog wat rood licht afkomstig is.



Figuur 6 Verband tussen lichtsterkte en deviatie a. volgens de geometrische optica en b. rekening houdend met interferentie en buiging.

De grootste lichtsterkte wordt volgens de geometrische optica (a) bereikt bij een deviatie van 138° . Voor grotere deviaties neemt de lichtsterkte snel af. Wanneer rekening wordt gehouden met buiging en interferentie (b) is de maximale lichtsterkte kleiner. Verder vinden we het maximum van de lichtsterkte bij een iets grotere waarde van de deviatie. Bovendien treden er meerdere maxima op. Deze veroorzaken de z.g. overtallige bogen.

De gedachte dat de regenboog ons de spektrale kleuren toont wordt in de hand gewerkt door een verklaring zoals met behulp van figuur 1b, waarbij slechts één lichtstraal in beschouwing wordt genomen en waarin het aksent ligt op de kleuren van de boog, niet op de lichtsterkte. Een dergelijke aanpak is bovendien onjuist omdat de plaats waar de regenboogstraal de druppel invalt voor rood en violet

hetzelfde wordt genomen. In het aanhangsel wordt aangetoond dat dit niet het geval is.

Interferentie en buiging

Uit de 'klassieke' verklaring van de regenboog met behulp van de geometrische optica bleek reeds dat in de regenboog geen zuivere spektrale kleuren zichtbaar zijn. Aan de recentere aanvullingen van de regenboog, waarbij interferentie en buiging een rol spelen, kunnen verdere argumenten ontleend worden.

Dat interferentie een rol speelt kan men als volgt inzien. Uit figuur 5 blijkt dat een deviatie van bijvoorbeeld 145° optreedt bij twee verschillende invalshoeken. Lichtstralen die 145° van richting worden veranderd kunnen dus twee verschillende wegen afleggen door de regendruppels. Daardoor kunnen faseverschillen ontstaan tussen lichtstralen die een waarnemer vanuit dezelfde richting bereiken, waarbij versterking of uitdoving optreedt.

De regenboog vormt een scherpe begrenzing tussen een lichtgebied en een schaduwgebied aan de hemel. Vanuit het schaduwgebied aan de buitenzijde van de regenboog komt geen licht dat een stralengang van figuur 1b heeft doorlopen; vanuit het lichtgebied aan de binnenzijde van de boog wél. Aan deze scherpe begrenzing treden buigingsverschijnselen op, die we ook kennen van schaduwen van spelden of van scheermesjes in een laserbundel. In figuur 6 wordt de lichtsterkte van oranje licht volgens de geometrische optica (a) vergeleken met een lichtsterkte, waarbij interferentie en buiging in de berekeningen zijn betrokken (b). In het laatste geval (b) is het maximum minder scherp. Verder zien we kleurherhalingen optreden. Beide kenmerken zullen het ontstaan van niet-spektrale kleuren bevorderen. De onder het kopje 'bezwaren' genoemde waargenomen kenmerken van de regenboog kunnen met behulp van figuur 6b begrepen worden. De deviatie van het rood in de regenboog is groter. De overtallige bogen ontstaan door de kleurherhalingen. De wisseling in de mate waarin de verschillende kleuren voorkomen hangt samen met de invloed van de druppelgrootte op figuur 6b.

Verdere factoren

Twee factoren die het ontstaan van niet spektrale kleuren in de regenboog in de hand werken werden nog niet genoemd. De eerste is het feit dat de zon geen puntvormige lichtbron is, maar een breedte heeft van 32 boogminuten. Daardoor krijgt elke kleur in de regenboog meer ruimte toegemeten dan bij een puntvormige lichtbron het geval zou zijn.

Als tweede faktor is het diffuse licht van belang, dat van dezelfde plaats aan de hemel afkomstig is als het regenbooglicht. De belangrijkste bijdrage levert het licht dat wordt teruggekaatst door dezelfde regendruppels die de regenboog vormen. Overigens is dit zwak in vergelijking met het regenbooglicht⁸. Gelukkig maar, anders zou het verschijnsel in het geheel niet kunnen worden waargenomen!

Een minieme hoeveelheid licht komt van de 18e en 19e regenboog¹⁰. Deze worden gevormd door licht dat 18 resp. 19 inwendige terugkaatsingen in een regendruppel heeft ondergaan. Ze bevinden zich op dezelfde plaats aan de hemel als de gewone regenboog.

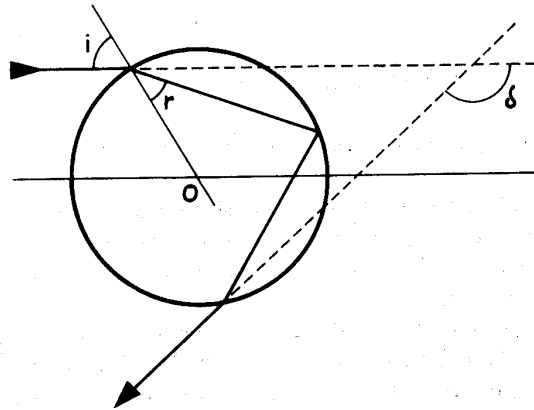
Samenvatting en conclusies

Het licht van de regenboog bestaat niet uit spektrale kleuren. Het zou jammer zijn als daardoor de regenboog uit de klas zou verdwijnen, resp. er zijn intrede niet in zou doen. Het blijft een voorbeeld van een verschijnsel waarin kleurschifting een belangrijke rol speelt. Bovendien is het een geschikte manier om aan te geven wat (ongeveer) bedoeld wordt met spektrale kleuren. Het is echter wel van belang te beseffen dat de koppeling regenboog - spektrale kleuren niet is gebaseerd op de huidige theorie van de regenboog of op zorgvuldige waarnemingen. Verklaringen, zoals aan het begin van dit artikel met behulp van figuur 1b gegeven, worden te vaak als volledig geaccepteerd. Door de resultaten van die verklaring aan 'de natuur' op te dringen (denk ook aan 'de 7 kleuren van de regenboog') beperken we de mogelijkheden om te genieten van de werkelijke kleurenrijkdom en verscheidenheid van de regenboog.

Aanhangsel

De deviatie van een lichtstraal die invalt op een bolvormige regendruppel en na één inwendige terugkaatsing weer uittreedt bedraagt^{9,10}

$$\delta = 180^\circ + 2i - 4r \text{ (figuur 7).}$$



Figuur 7 Geometrie lichtstraal regenboog. $\delta = 180^\circ + 2i - 4r$.

De minimale waarde van δ wordt bereikt als

$$\frac{d\delta}{di} = 0$$

Als we r uitdrukken in i met behulp van de wet van Snellius vinden we voor de waarde van i waar bij minimumdeviatie optreedt¹⁰

$$\cos i = \left[\frac{1}{3}(n^2 - 1)\right]^{\frac{1}{2}}$$

Een grotere brekingsindex geeft dus een kleinere invalshoek ($0 < i < 90^\circ$). Het punt waar de 'violet' lichtstraal de druppel invalt ligt dus onder het voor rood aangegeven punt.

Voetnoten

1. Zie bijvoorbeeld: Jardine, *Natuurkunde ... Doen* 2M blz. 118, 2H blz. 145 (z.j.); Zandstra e.a. *Van bekijken tot begrijpen* 2H blz. 88 (1970); Zandstra e.a. *Door werken tot weten* 3.14;

- Van den Dool e.a. *Moderne Natuurkunde 2*, leesstuk 16; Jonker e.a. *Hoe en Waarom M2*, blz. 116 (1970) Zweers/Lignac *Begrijpen en toepassen 2*, blz. 114 (1970) PLON 3.5 (Kleur en Licht) blz. 26 (1979); *DBK-na* Natuurkunde voor de derde klas blok 12, E7 (1978).
2. Hewitt, *Conceptual Physics*. Boston 1977³.
 3. Soms ook direkt gezegd, bijvoorbeeld in 'Hoe ontstaat de regenboog' *Archimedes* 14 (1), 1 (oktober 1977).
 4. M. Minnaert, *De natuurkunde van 't vrije veld I* Zutphen 1968⁵
 5. C. Floor, 'Regenbogen', *Natuur en Techniek* 45, 814 (december 1977).
 6. H. M. Nussenzweig, The theory of the rainbow, *Scientific American* 236(4), 116 (april 1977).
 7. R. A. R. Tricker, *Introduction to meteorological optics*, New York, London 1970.
 8. S. Rösch, Der Regenbogen in Wissenschaft und Kunst, *Applied Optics* 7, 233 (februari 1968).
 9. R. S. Whitaker, Physics of the Rainbow, *Physics Teacher*, mei 1974, blz. 283.
 10. J. D. Walker Multiple Rainbows from single drops of water and other liquids *Am. J. Ph.* 44, 421 (mei 1976).
-