De reputatie

van

Het principe van Huygens

Hendrik de Lang

(1920 - 2010)

Voorwoord

De laatste tien jaren voor zijn dood (op 7 oktober 2010) heeft mijn vader met tussenpozen gewerkt aan een artikel over het principe van Huygens. In dit stuk neemt hij het op voor Huygens tegenover kritische geluiden die er in de loop der tijd te horen zijn geweest ten aanzien van diens lichttheorie zoals beschreven in de „Traité de la lumière". Net een week voor zijn overlijden kreeg ik de definitieve versie toegestuurd om aan het zetwerk en het tekenen van de figuren te gaan werken.

Ik heb Gijs Bouwhuis, oud medewerker van mijn vader op het NatLab, gevraagd de tekst en dan vooral mijn zetwerk, als corrector kritisch te bekijken. Omdat mijn vader er niet meer is om enige redactie op het stuk goed of af te keuren heb ik besloten de tekst zo veel mogelijk te presenteren zoals aangeleverd (overduidelijke type-fouten natuurlijk wel verbeterd) en de kritische kanttekeningen in een verantwoording weer te geven. Zo kan de lezer zelf oordelen. De verantwoording is te vinden op pagina 79.

Natuurlijk wil ik Gijs Bouwhuis graag hartelijk danken voor zijn vriendelijke medewerking en kritische blik. Ik hoop dat dit artikel een nieuw licht mag laten schijnen op de betekenis van het principe van Huygens.

Eltjo de Lang

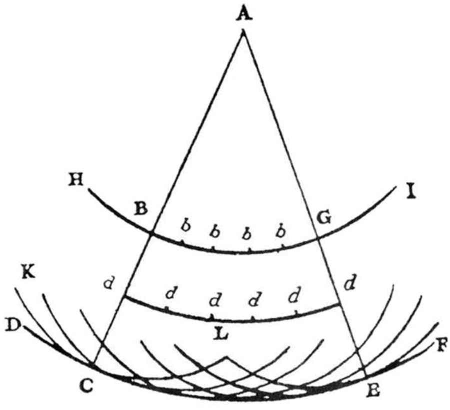
1. Inleiding

In de ontwikkeling van de golfoptica na 1800 heeft Fresnel een hoofdrol gespeeld. Combinatie van het interferentieprincipe van Young met het toen al meer dan honderd jaar oude principe van Huygens stelde hem in staat het gedrag van lichtgolven quantitatief te beschrijven.
In een recent artikel „wie was Thomas Young?" in dit tijdschrift [1] beschrijft Landsman hoe Young mede door eigen toedoen met mythen omgeven raakte. Volgens één daarvan zou voor de ontwikkeling van de golfoptica niet Fresnel maar Young de hoofdrolspeler zijn geweest.
In het hier volgende artikel zullen we zien dat ook Fresnel's resultaten met het principe van Huygens niet geheel aan mythevorming zijn ontkomen.
Aangaande het principe van Huygens zal blijken dat vooral recente op triviale misvatting berustende depreciatie het aanzien van Huygens' oerversie ernstig heeft geschaad.
Tenslotte wordt aangetoond dat een directe quantificatie van die oerversie met één enkele stootgolf aanzienlijk meer inzicht zou hebben opgeleverd dan Fresnel's historische quantificatie waarin die stootgolf werd vervangen door een harmonische golf.

2. Huygens' oerversie

Volgens Huygens [2, 3] is licht in essentie niets anders dan een mechanisch golfverschijnsel dat zich in een materieel medium voortplant met een bepaalde snelheid *c*.
Voor de beschrijving van de voortplanting van een lichtgolf postuleerde hij de aanwezigheid van uit die golf (hoofdgolf of primaire golf, *onde principale*) ontspringende zogenaamde secundaire golven (*ondes particulières*). Een later stadium van de zich voortplantende golf zou dan ontstaan ter plaatse van

de omhullende van de secundaire golven als superpositie van die golven. Dit is het „principe (beginsel) van Huygens”.



Figuur 1

In figuur 1, een facsimile van de originele figuur uit de *Traité* waarmee Huygens zijn concept illustreerde, is A de bron die één enkele stootgolf heeft uitgezonden. Op zeker moment heeft die golf de positie HBGI bereikt. Een tijd BC/c later (c = lichtsnelheid) ontstaat dan de situatie DCEF.
Opmerkelijk is dat er bij deze „constructie” geen sprake is van lichtstralen. Rechtlijnige voortplanting van het licht wordt dus niet vanzelfsprekend geacht. Dat moet uit de superpositie-eigenschappen van de secundaire golven worden afgeleid. De afleiding die Huygens zelf presenteert in zijn toelichting bij de figuur heeft geen bewijskracht omdat zijn redenering hoewel op zichzelf correct, zich beperkt tot het vlak van tekening. Het bewijs van rechtlijnige voortplanting voor het werkelijke driedimensionale geval heeft hij dus niet geleverd. Sterker nog, met zijn versie van het principe is dat zelfs onmogelijk. Dat bleek pas in 1869 uit een analyse [4] van de fysicus *Émile Verdet*. Gewoonlijk wordt dit onvermogen van Huygens’ oorspronkelijke

versie toegeschreven aan het ontbreken van periodiciteit. In werkelijkheid heeft het een andere meer fundamentele reden [5]. De kwestie komt nog uitvoerig ter sprake.

3. Adoptie door Fresnel en consolidatie door Kirchhoff

Huygens' ideeën over het licht als puur golfverschijnsel waren van het begin af sterk omstreden. Zij werden vrijwel algemeen verworpen zo niet genegeerd en raakten in vergetelheid.
Het was Fresnel die in 1818, dus meer dan honderd jaar later, het principe van Huygens toevoegde aan het reeds toegepaste interferentie-principe van Young (overigens pas nadat hij het kort tevoren nog categorisch had verworpen). Al spoedig werd hem op grond van zijn resultaten met deze combinatie een door de *Academie des Sciences* uitgeloofde prijs voor de beste verhandeling over diffractie toegekend [6] (de beroemde „*Mémoire Couronnée*", 1819).
Het eclatante succes met zijn versie van het principe van Huygens heeft geleid tot de suggestie dat Fresnel het door Huygens ingevoerde concept van secundaire golven van postulaat tot theorie zou hebben verheven. Dat is een misvatting: in werkelijkheid is hem dat ondanks pogingen daartoe, niet gelukt. Zo heeft hij de juiste uitdrukking voor de richtingsafhankelijkheid van de secundaire golven (de „scheefheids-factor") niet kunnen vinden en wist dientengevolge ook niet goed raad met het terugstralingsprobleem (kortweg: waarom is er wel de gewone zich van de lichtbron verwijderende golf maar geen naar de bron teruglopende?).
Tenslotte is er nog een belangrijk punt dat in de literatuur weinig aandacht krijgt: Fresnel maakt geen gewag van het feit dat de door superpositie verkregen golf een fase-achterstand van 90° heeft opgelopen [ref. 7, p.332]. Het is niet duidelijk of hij dat negeerde of misschien zelfs niet onderkende. De implicaties

van deze kwestie komen uitvoerig ter sprake.
We zien dus dat het principe van Huygens ook in de versie van Fresnel nog steeds een gepostuleerd voorschrift was en geen gefundeerde theorie. Er is geen fundamenteel verschil tussen de stootgolven van Huygens en de harmonische golven van Young-Fresnel. Maar pragmatisch gezien was er natuurlijk een enorm verschil: Fresnel's ingenieuze berekeningen waren alleen mogelijk met harmonische golven.
Hoe indrukwekkend Fresnel's resultaten ook waren, er bleven ernstige bedenkingen: diverse invloedrijke vakgenoten (waaronder ook Young) zagen weliswaar het belang van die resultaten maar konden er geen vrede mee hebben dat ze met behulp van de aan het vermaledijde principe van Huygens ontleende zuivere golfoptica waren verkregen. Pas na ca 1850 werd de zuivere golfoptica vrijwel algemeen aanvaard en het principe van Huygens kreeg daarin zijn plaats.
Tenslotte krijgt dan eindelijk in 1882 met de strenge formulering [8] van Kirchhoff het principe van Huygens na twee eeuwen de status van een gefundeerde theorie. Dat men in die dagen Huygens als grondlegger van dat principe in ere hield moge blijken uit Handbuch der Physik, Band 6 (1906) waar de titels van de opeenvolgende paragrafen over buigingstheorie luiden: *1. Historisches 2. Das Huygenssche Prinzip in Fresnel's Fassung 3. Strenge Formulierung des Huygensschen Prinzips.*

4. Hernieuwde kritiek

Omstreeks 1950 kwam het principe opnieuw onder vuur te liggen. De kritiek richtte zich nu op Huygens' oerversie. Vooral het ontbreken van periodiciteit als vermeende oorzaak van het onvermogen de rechtlijnige voortplanting te verklaren, werd als een ernstige fundamentele tekortkoming gezien. Het kwam zelfs zo ver dat Huygens' concept geen golfoptica zou mogen

heten omdat men van mening was dat Huygens' stootgolven geen „echte" golven zouden zijn.
Op de duur kreeg de kritiek een sterk depreciërend karakter en het kwam in 1990 bij het symposium *„Huygens' Principle, 1690-1990"* zelfs tot een pijnlijk incident.
Teneinde inzicht te verschaffen in de geldigheid van die kritiek zal ik de betreffende uitlatingen (voornamelijk van wetenschapshistorische zijde) stuk voor stuk bespreken.

5. Directe quantificering van Huygens' oorspronkelijke formulering

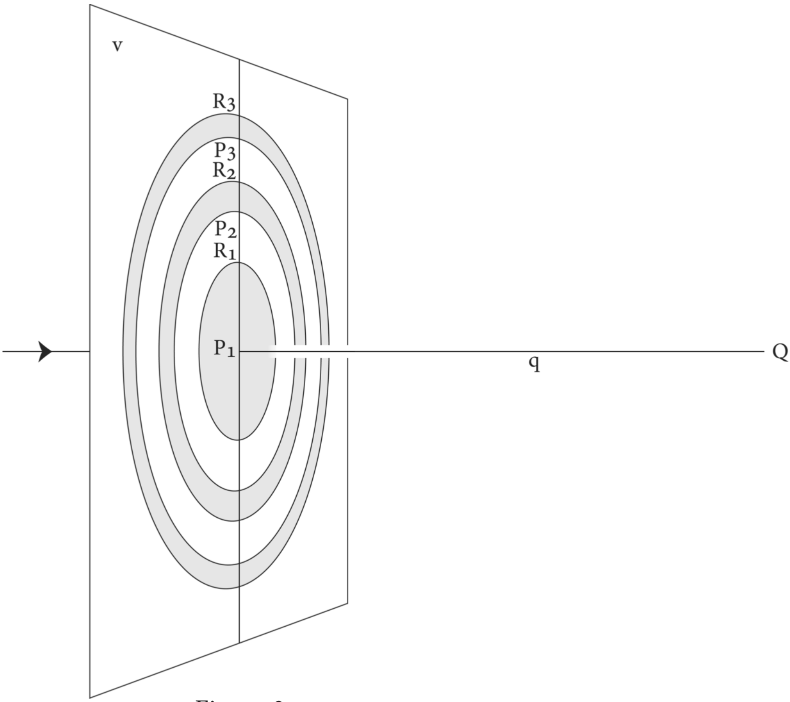
Het is gebleken [5, 9] dat het vermogen tot ontraadseling van het lichtvoortplantingsvraagstuk niet is voorbehouden aan de behandeling in termen van harmonische golven zoals die historisch heeft plaatsgehad. Ik wil hier laten zien dat directe toepassing van Huygens' formulering met één enkele puls van gequantificeerde vorm, met simpele middelen aanzienlijk meer inzicht zou hebben opgeleverd dan de historische behandeling met harmonische golven en ironisch genoeg blijkt het juist de periodiciteit te zijn die dat extra inzicht in de weg heeft gestaan.

Uiteenzetting met formules en figuren

6. Conclusies

5. Huygens' stootgolven en de rechtlijnige voortplanting

In *„Traité de la Lumière"* claimt Huygens rechtlijnige voortplanting voor zijn principe, maar de verklaring die hij daarvoor geeft [2, p.19; 3, p.21] werd vrijwel algemeen onbevredigend geacht. Opmerkelijk genoeg komt er pas in 1869 helderheid in deze kwestie als de Franse fysicus Émile Verdet onder de titel *„Critique de la théorie de Huyghens"* aantoont dat het door Huygens geformuleerde principe voor stootgolven geen rechtlijnige voortplanting kent. Dat betekent dus dat Verdet niet alleen de ondeugdelijkheid van Huygens' verklaring aantoont, maar algemener, laat zien dat een deugdelijke verklaring niet kan bestaan. Essentieel in Verdet's betoog is dat hij de golfvoortplanting terecht behandelt als een proces dat zich in drie dimensies afspeelt, dit in tegenstelling tot Huygens die het belang van de ruimtelijkheid over het hoofd lijkt te hebben gezien. Overigens worden er ondanks Verdet's duidelijke resultaat, vandaag de dag nog steeds pogingen ondernomen om het ongelijk van Huygens met een redenering in twee dimensies te bewijzen. Maar het betoog van Verdet, hoewel op zichzelf volkomen correct, heeft wel een ernstig bezwaar. Hij gaat namelijk uit van „oneindig scherpe" pulsen, d.w.z. pulsen met een tijdsduur nul in strikt mathematische zin. Dat hij het, door te kiezen voor zulke fysisch oneigenlijke pulsen daarbij niet kon stellen zonder infinitesimaalrekening, is een ongewenste complicatie. Wij gaan hier die complicatie vermijden door ons de nuancerende bewoordingen ter harte te nemen waarmee Huygens in de *„Traité"* de fysisch oneigenlijke situatie uitsluit, waartoe een beschrijving in termen van oneindig scherpe pulsen zou leiden. Teneinde te komen tot een alternatief bewijs dat bovengenoemd bezwaar niet heeft, kennen wij indachtig Huygens' kennelijke opvatting van de pulsgedaante, aan de stoten een kleine, doch van exact nul verschillende tijdsduur toe om dan met simpele wiskunde een betoog te houden dat vrij is van die complicatie en waarvan het resultaat niet alleen veel aanschouwelijker blijkt te zijn dan dat van Verdet, maar tevens de weg wijst naar de in het volgende hoofdstuk te behandelen integraalvorm van het principe van Huygens. De essentie van het betoog is te zien in figuur 2:



Figuur 2

Overal uit het golffront V van een vlakke golf ontspringen op het tijdstip nul gelijktijdig secundaire golven die na hun ontstaan nog een tijd T (de stootduur) aanhouden. Het is duidelijk dat wegens de eindigheid van de lichtsnelheid c, de secundaire golven het punt Q later zullen bereiken naarmate hun oorsprong verder van Q verwijderd is. Op het tijdstip q/c „ziet" Q het begin van de puls in P_1 verschijnen. Naarmate de tijd voortschrijdt komt de puls verder tevoorschijn als een uitdijende schijf totdat op het tijdstip q/c + T in P_1 het einde van de puls zich laat zien. Als R_1 het punt is waarvoor $QR_1 = q + cT$, bevindt het begin van de puls zich op dat tijdstip vanuit Q gezien op de cirkel met straal P_1R_1 en de puls levert dan in Q zijn volle bijdrage vanuit het gebied binnen die cirkel. Vanaf dit moment ziet Q uit P_1 en omgeving geen secundairen meer komen. De uitdijende schijf krijgt dus een gat, m.a.w. het wordt een uitdijende ring. Het laat zich gemakkelijk bewijzen dat de oppervlakte van dat uitdijende ringvormige gebied na het tijdstip q/c + T constant gelijk blijft aan die van de schijf in zijn eindstadium. Ter illustratie toont figuur 2 (ongeveer op schaal) de situaties op de tijdstippen q/c + T, q/c + 4T, q/c + 8T. Dat zijn dus achtereenvolgens de schijf in zijn eindstadium en de twee ringen. We zien dus dat het punt Q ook na het verstrijken van de pulsduur nog steeds bijdragen uit het golffront V blijft ontvangen: de naar Q voortgeplante puls heeft behalve een gedaanteverandering ook nog een „staart" gekregen en omdat het gebied van waaruit V daartoe bijdraagt zich niet beperkt tot de onmiddellijke omgeving van P_1 is er geen rechtlijnige voortplanting. Wie thuis is in de integraalrekening (Huygens is dat uiteraard nog niet, maar Fresnel en Verdet wel) zal het bovenstaande herkennen als een integratieproces dat de zich voortplantende golf blijkbaar ondergaat. In het hoofdstuk 6 zal dit idee in een kwantitatieve vorm worden geconcretiseerd.

Alvorens over te gaan tot een uitvoerige behandeling van de belangrijke consequenties van een directe quantificering van Huygens' oorspronkelijke formulering in termen van stootgolven [5, 9], moet eerst helderheid gebracht worden in de kwestie van de rechtlijnige voortplanting. We gaan daartoe naar het jaar 1818 toen door de adoptie van het beginsel van Huygens door de Franse fysicus A.J. Fresnel de ontwikkeling van de golfoptica een beslissende wending nam. Het interferentieprincipe van Young voor harmonische golven was toen al jaren ingeburgerd en speelde een cruciale rol bij het onderzoek van de door diffractie veroorzaakte intensiteitsstructuren. Het is dan ook niet verwonderlijk dat Fresnel van Huygens wel het concept overneemt dat sommatie van secundaire golven als de essentiële factor van het voortplantingsmechanisme aanwijst, maar zich niet inlaat met diens stootgolven. Pogingen om met de inmiddels beschikbare mathematische middelen tot een kwantitatieve behandeling van lichtvoortplanting te komen in termen van stootgolven (of meer algemeen in termen van niet-periodieke golven) werden kennelijk niet ondernomen en opmerkelijk genoeg vinden we pas in 1869 relevante literatuur over Huygens' stootgolven [13]. De auteur is Émile Verdet, een Franse fysicus (bekend van de naar hem genoemde Verdet-constante), die vanaf het begin betrokken was bij het werk van Fresnel. Onder de titel „*Critique de la théorie de Huyghens*" ontkracht hij Huygens' claim dat in diens model een later stadium van de voortschrijdende golf tot stand zou komen als plaatselijke verdichting van de uit een eerder stadium ontspringende secundaire golven. Door analyse namelijk van dit door Huygens geponeerde mechanisme toont Verdet aan dat er daarbij in tegenstelling tot wat Huygens beweert, van zo'n verdichting geen sprake is (zie voor Verdet's bewijs appendix 1). Wel wijst Verdet uitdrukkelijk op Huygens' gelijk a posteriori waar het de verklaring van reflectie en breking betreft. Immers, het bij die verklaring gebruikte argument [2, p.18], dat de omhullende van de secundaire golven op een bepaald tijdstip de buitenste begrenzing (later golffront genoemd) vormt van de

tot dat tijdstip voortgeschreden golfbeweging, blijft geldig.
Maar voor een ander zeer belangrijk aspect van Huygens' model, de vermeende rechtlijnige voortplanting, is het door Verdet aangetoonde ontbreken van verdichting desastreus. Het impliceert namelijk dat het gebied van waaruit secundaire golven bijdragen tot de hoofdgolf in een bepaald punt, in tegenstelling met wat Huygens meende, niet beperkt blijft tot de onmiddellijke omgeving van de verbindingslijn van dat punt met de bron [zie ook 5, pp. 22 en 23]. Dit is een belangrijk gevolg van Verdet's betoog: Voor het eerst werd hier het reeds lang bestaande vermoeden bevestigd dat Huygens' model de rechtlijnige voortplanting niet kan verklaren. Wat het oorspronkelijke positieve resultaat van Huygens zelf betreft: doordat hij in tegenstelling tot Verdet verzuimde de derde dimensie in zijn overweging [zie fig.1; 2, pp.18, 19 en 20; 5, p.23] te betrekken, concludeerde hij ten onrechte tot rechtlijnige voortplanting. Het lijkt hem te zijn ontgaan dat zijn tweedimensionale tekening geen bewijskracht hoeft te hebben voor het in wezen drie-dimensionale probleem van de lichtvoortplanting. Dat Huygens' conclusie voor het oneigenlijke tweedimensionale geval op zichzelf wel correct was, wordt bevestigd als in Verdet's betoog de situatie tot twee dimensies wordt gereduceerd (zie appendix 1). Op de wederwaardigheden van Huygens' argumenten kom ik nog terug. Aan Verdet kan dus het inzicht worden ontleend dat een adequate behandeling van het in wezen drie-dimensionale probleem van de verenigbaarheid van de stralenoptica met het concept van de golfvoortplanting een drie-dimensionale aanpak vereist. Helaas is Verdet's betoog in dit opzicht voor de historiografie geen eyeopener geweest en zo kon het gebeuren dat honderd jaar na dato de vooraanstaande wetenschapshistoricus A.E. Shapiro, ondanks het hem bekende resultaat van Verdet, met een

(overigens ook in andere opzichten verkeerde) redenering in twee dimensies, het ongelijk van Huygens probeert te bevestigen [12]. De kwestie zal in appendix 2 bij de bespreking van de publicaties van Shapiro, Hakfoort en Andriesse nader worden toegelicht.
Terugkomend nu op Verdet, voorlopig kunnen we vaststellen dat hij als eerste heeft aangetoond dat in het oorspronkelijke door Huygens gepresenteerde golfvoortplantingsmodel geen stralenoptica past. Maar zijn betoog, hoewel op zichzelf correct, roept wel vragen op. Waarom bijvoorbeeld, vraagt hij zich niet af welke misvatting Huygens tot een verkeerde conclusie voerde? En waarom gaat hij niet in op de vraag of het echt wel waar is dat eenzelfde procédé (sommatie van secundairen) voor harmonische golven wel, maar voor stootgolven niet tot een zinvol resultaat zou leiden? Tenslotte de belangrijkste vraag: Doet Verdet's betoog met de daarin gehanteerde fysisch oneigenlijke „oneindig scherpe" stootgolven (tijdsduur exact nul) wel recht aan Huygens' opvatting van de gedaante van zijn golven? Het is waar dat uit diens tekst valt op te maken dat het hem om kortdurende stoten ging („*Outre que de chaque point lumineux il peut venir plusieurs milliers d'ondes dans le moindre temps imaginable,* - - - -" [2, p.17]), maar van een stootduur nul is nergens sprake. En als hij ter verklaring van de rechtlijnige voortplanting aanvoert dat in de schaduw de secundaire golven niet tegelijkertijd bijdragen („*ne concourent point en mesme instant*" [2, p.19]), hoeft dat geenszins te betekenen dat de term „tegelijkertijd" in de strikt mathematische, maar fysisch oneigenlijke betekenis moet worden opgevat. Veeleer lijkt het hier te gaan om het meer realistische begrip „tegelijkertijd althans nagenoeg". Alleen al op grond van deze overwegingen ligt de keuze voor „oneindig scherpe" stoten in een analyse van Huygens' voortplantingsmodel allerminst voor de hand.

Maar het doorslaggevende argument vinden we bij Huygens zelf. Zijn principe formulerend [2, p.18] schrijft hij (de voor de huidige discussie belangrijke sleutelwoorden heb ik vet gedrukt): „ *& il est clair qu'il aura que l'**endroit** C de l'onde KCL qui touchera l'onde DCF, scavoir celuy qui est dans la droite menée par AB. De mesme les autres particules comprises dans la sphere DCF comme bb . dd &c auront fait chacune son onde. Mais chacune de ces ondes ne peut estre qu'infiniment foible comparée à l'onde DCF, à la **composition** de la quelle toutes les autres **contribuent** par la **partie** de leur surface qui est la plus élongée du centre A. - - - -* ". Met de in deze formulering gemarkeerde nuanceringen (plek of gebied C inplaats van punt C, deel van het oppervlak inplaats van punt van het oppervlak of raakpunt) vermijdt Huygens de fysisch oneigenlijke situatie waartoe een rigoureus meetkundige beschrijving in termen van oneindig scherpe pulsen zou hebben geleid. In dit laatste geval zou het in de formulering juist wel **punt** C en **punt** van het oppervlak of **raakpunt** moeten zijn.
Huygens' omzichtigheid in dezen vinden we niet terug in latere discussies over dit onderwerp. Men gaat simpelweg uit van stoten met tijdsduur nul. In tegenstelling tot wat men op het eerste gezicht zou kunnen denken heeft deze „vereenvouding" de behandeling van het probleem van de rechtlijnige voortplanting niet vergemakkelijkt. Integendeel: het werd er juist moeilijker door omdat zinvol rekenen met de singuliere oneindig scherpe pulsen speciale voorzorgen vereist. Verdet kon het dan ook niet stellen zonder enige infinitesimaalrekening1). De al genoemde poging van Shapiro [12] om Huygens' falen te bewijzen zonder bovengenoemde voorzorgen kunnen we hier gevoeglijk buiten beschouwing laten.
Zo blijft dus alleen Verdet's betoog over. Het toont weliswaar overtuigend aan dat in het door Huygens geformuleerde golf-

voortplantingsmodel geen stralenoptica past, maar de ondanks Huygens' nuancerende indicatie gekozen oneindig scherpe pulsvorm leidt tot een ongewenste complicatie. Om die te vermijden moeten we dus uitgaan van stoten met een zekere tijdsduur. Het bewijs kan dan zonder infinitesimaalrekening worden verkregen. Dat gaat als volgt (zie figuur 2). Zonder schade aan de algemeenheid mogen we (evenals Verdet) uitgaan van een vlakke golf. Overal uit het vlak V ontstaan gelijktijdig secundaire golven die na hun ontstaan nog een tijd T (de stootduur) aanhouden. De vraag is: Hoe „ziet" het verderop gelegen punt Q dit gebeuren? Het is duidelijk dat wegens de eindigheid van de lichtsnelheid c, de secundaire golven het punt Q later zullen bereiken naarmate hun oorsprong verder van Q verwijderd is. Als we stellen dat de secundaire golven op de tijd nul uit V ontspringen, dan zal op het tijdstip q/c het begin van de secundaire golf uit het voetpunt P_1 het punt Q bereiken. Het eindstadium van die secundaire golf bereikt Q op het tijdstip $q/c + T$. Inmiddels is dan het begin van de secundaire emissie uit V „zichtbaar" geworden vanuit de punten van V die tot Q een afstand $q/c + T$ hebben. Dat zijn de punten van de cirkel om P_1 met straal $P_1 R_1 = ((q + cT)^2 - q^2)^{½} = (2qcT + (cT)^2)^{½}$. Op het tijdstip $q/c + T$ „ziet" Q dus op de cirkelomtrek het beginstadium van de uit V ontspringende secundaire golven en in het middelpunt P_1 het eindstadium. De oppervlakte van de cirkel is dus een maat voor het totale effect van de secundaire golven in Q op het tijdstip $q/c + T$. Nemen we aan dat $T << q/c$ (kortdurende pulsen) dan kan $(cT)^2$ in de uitdrukking voor de straal verwaarloosd worden zodat bij goede benadering geldt $P_1 R_1 = (2qcT)^{½}$. De oppervlakte van de cirkel is dus $2\pi qcT = S$. Als de tijd verder toeneemt met t tot $q/c + T + t$ „ziet" Q geen secundaire golven meer komen uit het gebied binnen de cirkel met straal $(2qcT)^{½}$, aange-

nomen dat ook $t << q/c$. Het vanaf het tijdstip q/c uitdijende cirkelgebied zet zich vanaf het tijdstip $q/c + T$ voort als een uitdijend ringgebied begrensd door de cirkels met stralen $(2qc(T + t))^{½}$ en $(2qct)^{½}$. De oppervlakte van de ring is dus $2qc(T+ t - t) = 2qcT = S$. We zien dus dat die oppervlakte niet van t afhangt. De ring dijt uit maar versmalt tevens waardoor de oppervlakte constant blijft[2)]. Het effect van de secundaire golven in Q blijft dus na het tijdstip $q/c + T$ constant. Dat betekent dus dat in het golfvoortplantingsproces gedefinieerd door Huygens met zijn principe, de zich voortplantende puls naast een gedaanteverandering gedurende de pulstijd, ook nog een verlenging van de tijdsduur ondergaat. Een discussie over de vraag of de quasi-constante bijdrage van die „staart" in Q wel effectief kan zijn moet hier achterwege blijven. Ter illustratie zijn in figuur 2 de gebieden aangegeven die Q „ziet" op de tijdstippen $q/c + T$, $q/c + 4T$ en $q/c + 8T$. Dat zijn dus achtereenvolgens de schijf en de twee ringen[3)]. We zien dus dat voor pulsen waaraan we indachtig Huygens' nuancerende terminologie een tijdsduur hebben toegekend, Verdet's resultaat voor oneindig scherpe pulsen met een elementair betoog kan worden bevestigd. Ook hier blijkt dat Huygens' redenering in twee dimensies op zichzelf in zekere zin wel correct was. In de tweedimensionale situatie gaat het namelijk niet om de oppervlakten van de schijf en de ringen maar om de lengte van de lijnstukken PR en we zien dat de lengte daarvan naar buiten toe afneemt. Maar dat neemt natuurlijk niet weg dat een redenering in twee dimensies geen bewijskracht heeft voor het werkelijke driedimensionale geval. Bovendien, mocht men het principe willen toepassen voor de beschrijving van golfvoortplanting in het platte vlak, dan zou deformatie van de zich voortplantende puls een struikelblok zijn.
Terug nu naar Huygens zelf: het is opmerkelijk dat hij in de

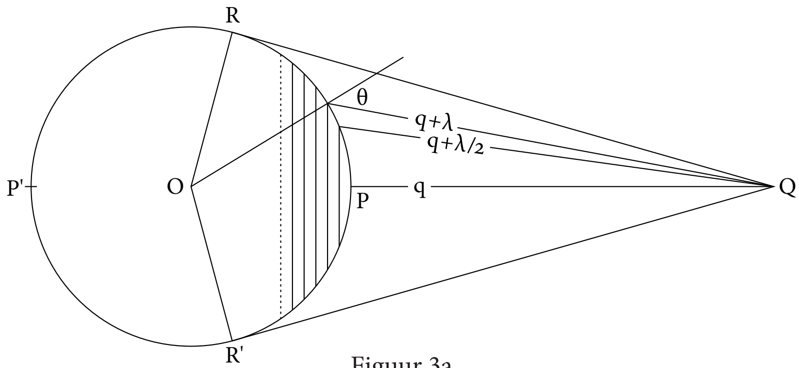
Traité de verdediging van zo'n toch waarlijk niet geringe claim als die op rechtlijnige voortplanting afdoet met enkele nauwelijks toegelichte beweringen [2, p.18-20; 3, p.19-21; 5, p.22-23] waardoor het lijkt of hij aangaande de geldigheid van zijn claim geen enkele twijfel zou koesteren. Maar die schijn bedriegt. In het manuscript van de *Traité* namelijk, stonden er oorspronkelijk wel degelijk uitvoeriger toelichtingen [12, pp.208 210 219]. Maar die werden blijkbaar geschrapt en niet vervangen door nieuwe. De vraag rijst dus of Huygens op het punt van rechtlijnige voortplanting echt wel zo zeker van zijn zaak was als door de uiteindelijke gedrukte tekst wordt gesuggereerd. Of hij er zelf van uitging (of misschien alleen maar hoopte) dat rechtlijnige voortplanting op de één of andere manier toch wel verenigbaar zou kunnen zijn met zijn denkbeelden weten we dus eigenlijk niet. Duidelijk is wel dat hij daarvoor in het kader van zijn eigen formulering van het beginsel geen deugdelijke argumenten heeft geproduceerd en het heeft er alle schijn van dat hij dat zelf ook wel wist. In zijn geromantiseerde Huygens-biografie hanteert Andriesse [15] in dit verband de nogal krasse termen „verdwijntruc" en „pure bluf". We komen daar nog op terug. Het is mogelijk dat Huygens wel besefte dat verder zoeken geen zin had. Maar dat het twee eeuwen heeft moeten duren voordat iemand (Verdet dus) de moeite nam het met een deugdelijk betoog aan te tonen, is kenmerkend voor een zekere onzorgvuldigheid die Huygens' erfenis ten deel is gevallen, een onzorgvuldigheid, in het bijzonder ook ten aanzien van de precieze bewoordingen van Huygens' originele tekst, die tot op de huidige dag voortduurt.

Men kan zich afvragen of Huygens een bewijs als het hier zojuist gepresenteerde niet zelf had kunnen vinden. De benodigde middelen (eenvoudige meetkunde en rekenkunde met stoten van een zekere tijdsduur 4)) lagen wel binnen zijn bereik.

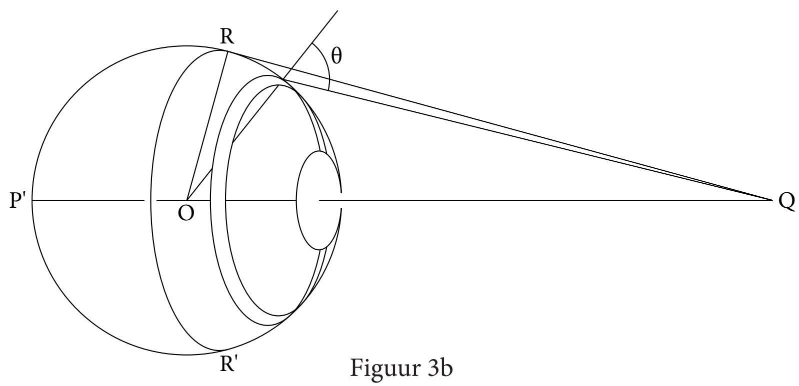
En tot zijn gedachtegoed hoorde ook de invloed van de eindigheid van de lichtsnelheid op de waarneming van gebeurtenissen op afstand. Hij maakt immers met instemming gewag [2, p.7; 3, p.8] van het geniale idee dat de Deense astronoom Ole Rømer in 1676 in staat stelde de lichtsnelheid te bepalen uit de vertraging van het eclipseren van de manen van Jupiter. Bij de beschrijving van de lichtvoortplanting is het net andersom. Daar is de eindige (vaste) waarde van de lichtsnelheid juist het gegeven, waaruit dan afgeleid kan worden wanneer de uit een oppervlak ontspringende secundaire golven een verderop gelegen punt zullen bereiken. Maar hoe voor de hand liggend het op grond van dit alles ook moge schijnen dat Huygens zo'n betoog had kunnen houden, het is nu eenmaal zo dat hij het ten aanzien van de rechtlijnige voortplanting om welke reden dan ook heeft gelaten (heeft moeten laten) bij een zeer oppervlakkige argumentatie. Wel kunnen we stellen dat het hier voorgestelde bewijs niet meer kennis vraagt dan wat we Huygens op grond van zijn tekst mogen toeschrijven, dit, zoals we al zagen in tegenstelling tot dat van Verdet waar het rekenen met oneindig scherpe pulsen een extra mathematisch trucje nodig maakte. Maar juist door dat trucje leent het zich niet voor verdere quantificatie en zal daardoor initiatieven tot nader onderzoek van Huygens' ideeën niet hebben aangemoedigd. Dankzij Huygens' genuanceerde opvatting ten aanzien van zijn pulsen kent het vorenstaand gepresenteerde bewijs dat probleem niet. Dat doet de vraag rijzen of het mogelijk is dat bewijs te quantificeren met de mathematische middelen die honderd jaar na Huygens ter beschikking waren, om aldus inzicht te krijgen in de dieper liggende oorzaken van het falen van sommatie van secundaire pulsen als „recept" voor een deugdelijk golfvoortplantingsmodel. Het antwoord ligt eigenlijk al besloten in het resultaat van het ons [aangereikte] elementaire bewijs. We herkennen daarin namelijk een integratieproces dat de zich voortplantende puls kennelijk ondergaat. Het is dan ook gebleken [5, 9] dat met een simpel integratieprocédé een quantificatie kan worden verkregen die niet alleen zoals verwacht, bevestigt dat een golfvoortplantingsmodel waarin de secundairen een directe voortzetting zijn van de primaire golf, zoals bij Huygens, geen rechtlijnige voortplanting kent maar tevens definitief afrekent met de mythe dat de fundamentele oorzaak van het falen van Huygens' pulsmodel ten aanzien van de rechtlijnige voorplanting in het ontbreken van periodiciteit moet worden gezocht. In het volgende hoofdstuk zal dat integratieprocédé worden geformuleerd en vervolgens zal blijken dat een van deze quantificatie uitgaand alternatief scenario belangrijk inzicht zou hebben opgeleverd dat in het reguliere scenario lang verborgen bleef en dat het ironisch genoeg juist de preoccupatie met harmonische golven en het daarbij behorende concept van Fresnelzones is geweest die het verwerven van dat inzicht zo lang in de weg hebben gestaan. Ik noem hier alvast een frappant voorbeeld van zo'n pas laat verworven inzicht [zie 17, p.448: „*The boundary diffraction wave*"]: Het was Young al in 1802 opgevallen dat vanuit de schaduw gezien de rand van een scherm of diafragma lichtgevend lijkt te zijn. Hij onderkende het belang van deze waarneming en probeerde die ook te verklaren [18]. Maar die verklaring was niet overtuigend. Zijn ideeën kregen geen bijval en raakten in vergetelheid. Pas in 1896, een eeuw later dus, ontdekte Sommerfeld [19, 17, p.553] bij een strenge behandeling van het probleem van de diffractie aan een perfect geleidend scherm met rechte rand, dat volgens de theorie het buigingslicht inderdaad zoals Young al in 1802 had geconstateerd, afkomstig moet zijn uit een smalle strook langs de schermrand. We zullen zien dat dit inzicht zich in ons alternatieve scenario al heel vroeg aandient.

6. Het principe van Huygens in integraalvorm

Het elementaire bewijs, dat in het vorige hoofdstuk het falen van het principe van Huygens t.a.v. de rechtlijnige voortplanting aantoonde, wordt in integraalvorm gebracht. De uitkomst van die integratie bevestigt niet alleen dit falen, maar onthult tevens de remedie. Nu blijkt namelijk expliciet dat bij voortplanting volgens het principe van Huygens in zijn oorspronkelijke formulering de golfvorm inderdaad een integratieproces ondergaat. Dat dwingt tot nadere beschouwing van het postulaat van de secundaire golven. Aangenomen moet worden dat



Figuur 3a



Figuur 3b

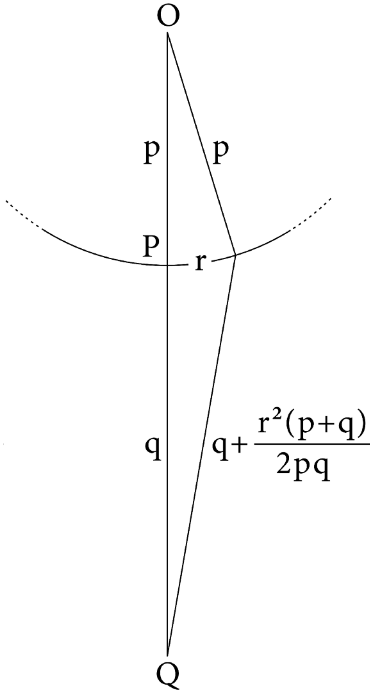
de uitwijking van de uit de hoofdgolf ontspringende secundairen, niet zoals oorspronkelijk stilzwijgend als vanzelfsprekend aangenomen, evenredig is met de uitwijking van de hoofdgolf, maar met de afgeleide van die uitwijking naar de tijd. Adoptie van de aldus geamendeerde vorm van het postulaat leidt dan tot een voortplantingsmodel voor stootgolven dat zowel in behoud van golfgedaante als in rechtlijnige voortplanting voorziet en waarbij dat laatste des te beter vervuld is naarmate de pulsduur korter is. Het blijkt namelijk dat al het licht dat Q bereikt, afkomstig is van een centrale schijf waarvan de straal evenals in het elementaire bewijs uit het vorige hoofdstuk, evenredig is met de wortel van de pulsduur.
In zijn golfvoortplantingsmodel volgt Fresnel het principe van Huygens, maar diens enkelvoudige puls vervangt hij door een harmonische golf. Om de totale bijdrage van alle secundairen uit het vanuit Q (zie figuur 3) „zichtbare" gedeelte van het golffront, d.w.z. het gedeelte rechts van de cirkel RR' [5)] te kunnen bepalen, verdeelde hij dat in ringvormige gebieden (de beroemde Fresnelzones), van elkaar gescheiden door cirkels met een afstand van de punten op hun omtrek tot Q volgens de reeks:
PQ + λ/2, PQ + λ, PQ + 3λ/2, PQ + 2λ, PQ + 5λ/2, -- etcetera, waarbij λ de lichtgolflengte voorstelt. De eerste zone is nog geen ring maar het bolschilletje om P. Verder toont figuur 3 nog de vijfde van de in totaal tien zones. In werkelijkheid zal dat aantal veel groter zijn omdat λ in de praktijk meestal veel kleiner is dan de systeemafmetingen. Omdat aangrenzende zones in tegenfase zijn en Fresnel aan het effect van zijn zones ook nog een gewichtsfactor $\cos\theta$ toekende, vormen de bijdragen van de opeenvolgende zones een afnemende alternerende reeks waarvan de totale bijdrage bij goede benadering gelijk blijkt te zijn aan de helft van de bijdrage uit de eerste zone. Ten onrechte

wordt daaruit wel eens geconcludeerd dat al het licht uit de eerste zone zou komen maar dat is een drogreden. De som van de reeks namelijk geeft van het licht dat in Q arriveert wel de hoeveelheid aan maar zegt niets over de plaats van herkomst. Bovendien is het een niet te negeren ongerijmdheid dat van het licht uit die eerste zone slechts de helft nodig is, wat de vraag doet rijzen waar de andere helft dan blijft. Maar het probleem is nog veel groter: de bijdrage uit de eerste zone is niet alleen twee maal te groot maar blijkt bovendien, erger nog, een faseachterstand van $\pi/2$ te hebben en dat betekent dus dat ook Fresnel's versie van het principe van Huygens voor een harmonische golf, het vereiste behoud van golfvorm niet kent. In dit opzicht is Fresnel's versie dus evenmin adequaat als Huygens' oorspronkelijke versie. Men zou dus kunnen zeggen dat Fresnel in feite beroemd is geworden met berekeningen gebaseerd op een fundamenteel inadequaat golfvoortplantingsmodel maar dat is minder bizar dan het lijkt omdat de tekortkomingen geen invloed hebben op de uitkomst van die berekeningen. Het is evident dat ook voor Fresnel's versie de gemodificeerde hypothese vereist is om behoud van golfvorm te waarborgen. Om dan vervolgens de rechtlijnige voortplanting te verklaren, is het noodzakelijk het concept van de harmonische golf als onverbrekelijke eenheid opzij te zetten door die golf te beschouwen als een reeks van aaneengesloten afwisselend positieve en negatieve afzonderlijke pulsen[6)]. Voor elke puls afzonderlijk is de bijdrage in Q uitsluitend afkomstig uit bovengenoemde centrale schijf en dat geldt dus ook voor de gehele reeks d.w.z. voor de harmonische golf als geheel. Substitueren we voor T de halve trillingstijd van het licht dan vinden we voor de straal van de schijf $(\lambda pq/(p+q))^{1/2}$ en dat is precies de straal van de eerste Fresnelzone. Ook rechtlijnige voortplanting dus voor de harmonische golf en die is des te beter vervuld naarmate de

golflengte λ kleiner is. Dat we nu verlost zijn van de bovengenoemde paradoxale factor twee vindt zijn verklaring in het feit dat elke puls slechts voor de helft van zijn verblijftijd in de eerste zone effectief is. Uit de literatuur blijkt dat Fresnel zich wel bewust was van het fase-defect maar het is niet duidelijk of hij het belangrijk vond.
In het volgende hoofdstuk zal de integraalvorm worden geformuleerd voor het geval dat de zich voortplantende golf obstakels ontmoet in de vorm van schermen en diafragma's.

Was het voor het elementaire bewijs in het vorige hoofdstuk niet geheel en al ondenkbaar dat Huygens zoiets zelf had kunnen bedenken, voor een direct uit dat bewijs voortvloeiende integraalvorm van de oervorm van het beginsel moeten we het natuurlijk niet meer bij Huygens zoeken, dit alleen al omdat integraalrekening hem vreemd was. Op zijn vroegst zou men zo'n versie mogen verwachten omstreeks 1818 van bijvoorbeeld Fresnel na diens herontdekking van het beginsel van Huygens en de daaruit voortvloeiende notie dat het gebied waarmee het front van een uit de puntbron O afkomstige golf bijdraagt tot de golfbeweging in een verderop gelegen punt Q, zich niet zoals voordien door hem aangenomen, beperkt tot de „pool" P (het snijpunt met OQ) en de rand van een eventueel aanwezig scherm of diafragma, maar zich in principe uitstrekt over het gehele vanuit Q zichtbare gebied van dat golffront. Dat betekent dus dat er over dat gebied moet worden geïntegreerd [7, p.160 e.v.].
We gaan nu zo'n integraal formuleren voor een zich vrij voortplantende stootgolf en daarbij zal blijken dat, wil de golfvorm bij voortplanting behouden blijven met een bij de doorlopen afstand passende tijdvertraging, het postulaat van de secundaire golven een nadere precisering behoeft. We zullen zien dat

de aldus geamendeerde integraalversie van het principe van Huygens een voortplantingsmodel oplevert dat voorziet in rechtlijnige voortplanting voor elke willekeurige al of niet periodieke golfvorm. In figuur 4 is O een puntbron die een stootgolf heeft uitgezonden. De uitwijking op het oppervlak van de bol met straal p is een functie $u_p(t)$ van de tijd die alleen van nul verschilt in het



Figuur 4

interval $0 < t < T$. De stootduur T wordt klein verondersteld t.o.v. de looptijden p/c en q/c (c = lichtsnelheid). De gedaante van de stoot kan betrekkelijk willekeurig worden gekozen. We gaan uit van het postulaat dat de op de bol ontstane secundaire golven de uitwijking van de primaire golf aldaar, zonder vertraging voortzetten en we vinden dan voor de uitwijking in Q:

$$u_q(t) = M\int_0^{2\pi}\int_0^{r_0(t)} u_p\left(t-\frac{q}{c}-\frac{r^2(p+q)}{2cpq}\right)d\varphi\, r\,dr$$

$$= 2\pi M\int_0^{r_0(t)} u_p\left(t-\frac{q}{c}-\frac{r^2(p+q)}{2cpq}\right) r\,dr \qquad (1)$$

Daarin is M een nader te bepalen constante en de bovenste integratiegrens $r_o(t)$ de straal van de cirkel met middelpunt P op welks omtrek op het tijdstip t het begin van de stoot vanuit Q „zichtbaar" is. We vinden:

$$(r_o(t))^2 = 2cpq\,\frac{t-\frac{q}{c}}{p+q} \qquad (2)$$

We kiezen een nieuwe variabele:

$$x = t - \frac{q}{c} - \frac{r^2(p+q)}{2cpq}$$

Dan volgt:

$$u_q(t) = \frac{2\pi cpqM}{p+q}\int_0^{t-\frac{q}{c}} u_p(x)\,dx \qquad (3)$$

Dit bevestigt ons eerder met elementaire middelen verkregen resultaat dat de bijdrage van de secundaire golven na het tijdstip q/c+T constant blijft. Echter, in tegenstelling tot het eerdere resultaat onthult de integraalvorm naast het falen van Huygens' model ook de remedie. We zien namelijk dat bij de voortplanting van P naar Q de golfvorm u_p een integratieproces heeft ondergaan en dus niet behouden is gebleven. De remedie is evident: In (3) moet de integrand u_p worden vervangen door zijn afgeleide naar de tijd: $\partial u_p/\partial t$. De uitkomst van de integratie is dan $u_p(t-q/c)-u_p(0) = u_p(t-q/c)$ en dat is precies wat van een deugdelijk golfvoortplantingsmodel verlangd moet worden: behoud van golfvorm en een met de afstand q corresponderende tijdvertraging q/c.
Het is duidelijk dat voor de formulering van dit model moet worden gepostuleerd dat de beginuitwijking waarmee de secundaire golven uit de hoofdgolf ontspringen niet zoals oor-

spronkelijk stilzwijgend als vanzelfsprekend aangenomen, evenredig is met de uitwijking u_p van de hoofdgolf, maar met de tijdafgeleide $\partial u_p/\partial t$. Wie deze vorm van het postulaat gekunsteld zou vinden, moet bedenken dat het resultaat van bovenstaande analyse geen andere keus toelaat. Wel moeten we opmerken dat door de nieuwe vorm van het postulaat de superpositie nu ook negatief bijdragende secundairen kent, evenzo overigens als dat het geval was door de invoering van de harmonische golfvorm[7].
Ingevolge de geamendeerde vorm van het postulaat moeten we nu dus inplaats van (3) voor de uitwijking in Q schrijven:

$$u_q(t) = \frac{2\pi cpqM}{p+q} \int_0^{t-\frac{q}{c}} \frac{\partial u_p(x)}{\partial t} dx = \frac{2\pi cpqM}{p+q} u_p(t-\frac{q}{c}) \qquad (4)$$

Wegens het vereiste behoud van energie (destijds *vis viva* genoemd) moet gelden:

$$u_q(t) = \frac{p}{p+q} u_p(t-\frac{q}{c}) \qquad (5)$$

Voor de daartoe nodige waarde van M vinden we dan:

$$M = \frac{1}{2}\pi qc \qquad (6)$$

We merken op dat M hier een van de golfgedaante onafhankelijke, universele constante is[8]. Van belang is nu welk gedeelte van de golf op het boloppervlak door P heeft bijgedragen. We zien in (4) dat na het tijdstip $t_1 = T+q/c$ het resultaat van de integratie niet meer verandert. Op dat tijdstip wordt „gezien" vanuit Q het einde van de puls zichtbaar in P en bij verder voortschrijdende tijd presenteert de puls zich evenals in het oorspronkelijke model als een uitdijende zich versmallende ring maar omdat het gemiddelde van $\partial u/\partial t$ over de pulsduur nul is, blijft de bijdrage van die ring constant gelijk aan nul. Voor Q komt het licht dus uitsluitend uit de schijf met straal $r_0(t)$ dit in tegenstelling dus tot het oorspronkelijke geval waar de secundairen vanuit de uitdijende ring blijven bijdragen omdat ze ongedifferentieerd uit de hoofdgolf zijn vertrokken. Door substitutie van $t = t_1 = T + q/c$ vinden we met behulp van (2) voor de straal van die schijf

$$r_0(t_1) = \sqrt{\frac{2cpqT}{p+q}} \qquad (7)$$

We zien dus dat het gebied van het golffront dat bijdraagt tot de uitwijking in Q beperkt blijft tot een ronde schijf waarvan de straal evenredig is met de wortel van de pulsduur T. Voor korte pulsen is er dus rechtlijnige voortplanting, althans nagenoeg. Voor oneindig scherpe pulsen (T = 0) ontstaat er perfecte stralenoptica waarin het golfkarakter van het licht zich niet meer manifesteert (geometrische benadering). Het spreekt vanzelf dat voor een reeks van elkaar met (al of niet regelmatige) tussenpozen opeenvolgende pulsen het bovenstaande geldt voor elke puls afzonderlijk. Dat betekent dus dat als voor alle pulsen de tijdsduur naar nul gaat, ook voor de gehele reeks de stralenoptica verzekerd is.

We zullen nu nagaan hoe Fresnel zich het sommeringsproces voor de uit het golffront ontspringende secundaire golven voorstelde. In figuur 3 zendt de puntbron O een harmonische golf uit. Op het oppervlak van de bol (straal r) is op elk moment de uitwijking overal even groot met dezelfde fase. Ingevolge het beginsel van Huygens kan men zich de harmonische beweging in dat vlak vanaf een bepaald tijdstip voortgezet denken als de verzameling van uit dat vlak zonder fasevertraging ontspringende secundaire golven. Om van die secundairen het totale effect in het verderop gelegen punt Q te bepalen neemt Fresnel eerst aan dat alleen de naar Q toegekeerde bolschil RPR' daartoe bijdraagt omdat hij het bestaan van binnenwaarts gerichte secundairen die de bijdrage van de complementaire schil RP'R' zouden moeten leveren uitgesloten acht (geen „terugstraling”) 9). Om een idee te krijgen van het totale effect van de bolschil RPR' belegt Fresnel die met een reeks aaneensluitende ringzones (de bekende zones van Fresnel), van elkaar gescheiden door cirkels waarvan de afstanden tot Q een oplopende reeks vormen. De n-de zone wordt begrensd door de cirkels met afstanden $PQ+(n-1)\lambda/2$ en $PQ+n\lambda/2$ waarin λ de lichtgolflengte voorstelt. De eerste zone is dus een bolschilletje om P. De verhoudingen in de figuur zijn zo gekozen dat er in totaal ongeveer tien zones zijn waarvan alleen de eerste en de vijfde zijn aangegeven. Maar omdat de golflengte meestal klein is, zal in realistische gevallen dat aantal natuurlijk veel groter zijn. Met bijvoorbeeld $OQ = 10$ cm en $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ cm wordt dat wel 76000. Aangezien voor elk paar opeenvolgende ringzones het verschil van de gemiddelde fase van hun bijdragen in Q gelijk is aan π, vormen de bijdragen van de opeenvolgende zones een alternerende reeks, en omdat Fresnel aan elke zone nog een gewichtsfactor $\cos\theta$ toekent (de zogenaamde scheefheidsfactor), krijgen we een alternerende reeks van termen waarvan de grootte geleidelijk afneemt tot nul bij het bereiken van de grens RMR'. Fresnel stelde vast dat de som van deze reeks (het totale effect dus) bij goede benadering gelijk is aan de helft van de eerste term (de bijdrage van de eerste zone). Hij had dit gegeven nodig om de amplitude van de gepostuleerde secundaire golven te kunnen relateren met die van de primaire golf. In sommige hedendaagse leerboeken wordt het ook expliciet voorgesteld als bewijs voor (nagenoeg) rechtlijnige voortplanting met het kennelijke argument dat voor Q al het licht uit de

eerste zone zou komen. Maar dat is een drogreden. Immers, met evenveel recht zou je kunnen beweren dat al het licht uit pakweg de derde of vijfde zone komt, want ook daarvoor geldt dat het totaal van alle bijdragen tot de uitwijking in Q een fractie is van die van elk van die zones. De gezaghebbende handboeken bezondigen zich natuurlijk niet aan deze drogreden maar waarschuwen ook niet voor de verleiding ervan wat menige lezer in de waan moet hebben gebracht dat het hier een doeltreffend argument voor rechtlijnige voortplanting zou betreffen. Overigens kent het argument nog een tweede ongerijmdheid: aangezien slechts de helft van de eerste term nodig is voor de uitwijking in Q moet men zich afvragen waar dan het licht vandaan komt dat nodig is om het door de eerste zone teveel geleverde te compenseren door destructieve interferentie[10)]. Maar het probleem is nog veel groter: het totale effect van de secundairen uit de eerste zone is niet alleen twee maal te groot maar heeft, erger nog, daarnaast ook nog een fase-achterstand van $\pi/2$[11)]. Dat betekent dat ook Fresnel's versie van het principe van Huygens voor een harmonische golf het vereiste behoud van golfvorm niet kent. In dit opzicht is Fresnel's versie dus evenmin adequaat als Huygens' oorspronkelijke versie[12)]. Men zou dus kunnen zeggen dat Fresnel in feite beroemd is geworden met berekeningen gebaseerd op een fundamenteel inadequaat golf-voortplantingsmodel. Strikt genomen is dat inderdaad het geval, maar het is minder bizar dan het lijkt. Bij die berekeningen gaat het namelijk uitsluitend om faseverschillen en daarop heeft een gemeenschappelijke fase-achterstand geen invloed. Overigens lijkt Fresnel zich wel bewust te zijn geweest van het fase-defect maar het is niet duidelijk of hij er veel belang aan hechtte. In de literatuur is hierover geen eenstemmigheid, zoals we straks zullen zien.
Om er achter te komen hoe het in Fresnel's model zit met de

rechtlijnige voortplanting, moeten we aannemen dat ook hier geldt dat de secundairen worden gegenereerd door de tijdafgeleide van de primaire golf. Verder is het nodig even afstand te nemen van de gangbare opvatting van de harmonische golf als één onverbrekelijk geheel door deze inplaats daarvan op te vatten als een reeks afzonderlijke (afwisselend positieve en negatieve) pulsen[13]. We gaan nu aantonen dat het geamendeerde postulaat ook voor Fresnel's versie voert tot een perfect voortplantingsmodel (behoud van golfvorm en een bij de afgelegde afstand q passende tijdvertraging q/c). We hebben gezien (zie (6)) dat elk van die pulsen via zijn tijdafgeleide alleen bijdraagt vanuit de schijf met straal

$$r = \sqrt{\frac{2cpqT}{p+q}}$$

Aangezien T hier de halve trillingstijd van het licht is, vinden we

$$r = \sqrt{\frac{\lambda pq}{p+q}} \qquad (8)$$

Dat is precies de straal van de eerste Fresnelzone. Het zal duidelijk zijn dat wat hier is afgeleid voor elke afzonderlijke halve periode, evenzeer geldt voor de tot één geheel aaneengeregen reeks daarvan. Ook voor de harmonische golf is dus al het directe licht in Q afkomstig uit het gebied dat overeenkomt met de eerste Fresnelzone. Rechtlijnige voortplanting dus, en die is ideaal vervuld voor golflengte nul[14].
Rest nog de vraag waarom bij de voorgaande beschouwing in termen van Fresnelzones de bijdrage van de eerste zone twee maal zo groot uitviel als nodig voor de uitwijking in Q, dit in tegenstelling tot de behandeling in termen van aaneengeregen halve perioden waar hetzelfde gebied die bijdrage op maat

levert. Voor de verklaring van die paradox moet worden bedacht dat voor elke zich in het golffront vanuit de pool uitbreidende als puls beschouwde halve periode, geldt dat die via haar tijdafgeleide slechts effectief is tot aan het tijdstip dat zij in haar geheel tevoorschijn is gekomen en alsdan de gehele eerste zone opvult. Vanaf dat tijdstip blijft de bijdrage nul omdat over de volle halve periode de tijdafgeleide gemiddeld nul blijft. Dat maakt dat elke halve periode in de eerste zone slechts voor de helft van haar verblijftijd aldaar effectief is, waarmee dan de paradoxale factor twee verklaard is. We hebben dus gezien dat voor de verklaring van de rechtlijnige voortplanting voor een harmonische golf een redenering is toegepast waarbij die golf niet als één geheel wordt gezien, maar wordt opgevat als een reeks van in de tijd opeenvolgende individuele enkelvoudige pulsen, positieve en negatieve halve perioden dus, die via hun tijdafgeleide bijdragen vanuit een centrale schijf ter grootte van de eerste Fresnelzone.
In het voorgaande is aangetoond dat in een golfvoortplantingsmodel, gebaseerd op het principe van Huygens in zijn originele formulering, de golfvorm niet behouden blijft, maar verschijnt in een geïntegreerde vorm. Om te geraken tot een consistent voortplantingsmodel waarbij de golfvorm wel behouden blijft met een tijdvertraging die correspondeert met de afgelegde afstand, moet derhalve worden gepostuleerd dat de generator voor secundaire golven niet, zoals oorspronkelijk (stilzwijgend) aangenomen, de primaire golf zelf is maar de afgeleide daarvan naar de tijd. Het aldus gedefinieerde voortplantingsmodel geldt dan universeel voor elke golfvorm. In het bijzonder is daarbij voor de verklaring van rechtlijnige voortplanting geen fundamentele rol weggelegd voor periodiciteit en dus ook niet voor het interferentieprincipe van Young met de daarvoor vereiste periodiciteit.

Dat de relativering van de vermeende noodzaak van periodiciteit (en daarmee die van het interferentie-principe van Young) voor de verklaring van rechtlijnige voortplanting al vroeg onderwerp van discussie was, blijkt uit de volgende passage [7, p.198] uit het boek van de wetenschapshistoricus Buchwald waar Fresnel en Poisson discussiëren over Poisson's kritiek op Fresnel's M.C. (*Mémoire Couronnée*). Buchwald schrijft: „ ------- *At no point in his argument with Poisson—or in the M.C. for that matter—did Fresnel suggest that the principle of interference should be used to explain rectilinear propagation. The reason he did not suggest it was that Fresnel, like Poisson, apparently insisted that rectilinear propagation must be guaranteed even for a single pulse, whereas interference requires a long wave train. In this context Poisson's criticisms were perhaps justified, since it is a difficult matter to formulate Huygens' principle at the outset in a way that will guarantee the rectilinear propagation of a single pulse*". We zien dus dat niemand minder dan Fresnel zelf van mening was dat ondanks het ontbreken van periodiciteit, ook de enkelvoudige puls als golf moet worden beschouwd waarvoor ook de rechtlijnige voortplanting zeker moet worden gesteld en dat dus in de verklaring van de rechtlijnige voortplanting de periodiciteit—en daarmee ook het principe van Young—geen fundamentele rol mag spelen[15)]. Op dit punt was zijn opponent Poisson het kennelijk wel met hem eens. Van belang is verder nog de laatste zin van bovenstaand citaat waarin Buchwald stelt dat realisering van de gevraagde formulering moeilijk zal zijn. Hij beroept zich daarbij op een passage [21, p.19] uit het standaardwerk van Baker & Copson over de wiskundige aspecten van het principe van Huygens. Er staat: „-----*to justify Huygens' principle for isolated waves, we must have recourse to analysis and take into account the dynamics of the medium in which the wave-motion occurs.*" Na dit korte intermezzo in termen van pulsgolven richten de auteurs zich dan weer op het principe van Huygens in termen van harmonische golven. Zij beschrijven hoe Fresnel worstelt met de materie om te geraken tot een zinvol voortplantingsmodel voor harmonische golven[16)] en zich tenslotte genoodzaakt ziet tot het adopteren van een tweetal hypotheses[17)]:

(i) the elements of S execute vibrations whose amplitude is to the amplitude in the primary wave is as 1:λ ;

(ii) the elements of S are oscillating a quarter of a period ahead of the primary wave.

We herkennen hierin het postulaat dat nodig was om met het daarmee geamendeerde principe van Huygens een bevredigend puls-voortplantingsmodel te verkrijgen. Maar er is natuurlijk wel een verschil. Omdat de gedaante van de puls willekeurig kan worden gekozen, kan het puls-voortplantingsmodel gelden als het algemene golf-voortplantingsmodel voor elke golfvorm, terwijl bovenstaande hypotheses slechts zijn geformuleerd voor de sinusvorm. Maar het is duidelijk dat de combinatie van de twee hypotheses het recept vormt voor differentiatie naar de tijd. Generalisatie voor de algemene golfgedaante, in het bijzonder voor een enkelvoudige puls, ligt dan voor de hand. Deze weg voert dus ook tot rechtlijnige voortplanting voor de enkelvoudige puls. Het is opmerkelijk dat Baker & Copson geen gewag maken van de mogelijkheid dat Fresnel door deze voor de hand liggende generalisatie van zijn twee hypotheses de rechtlijnige voortplanting van een enkelvoudige puls had kunnen verklaren.
Samenvattend: Het in dit hoofdstuk als alternatief scenario ingevoerde integratieprocédé definieert een golfvoortplantings-

model dat voor elke (al of niet periodieke) golfvorm voorziet in (bij benadering) rechtlijnige voortplanting met behoud van golfvorm.

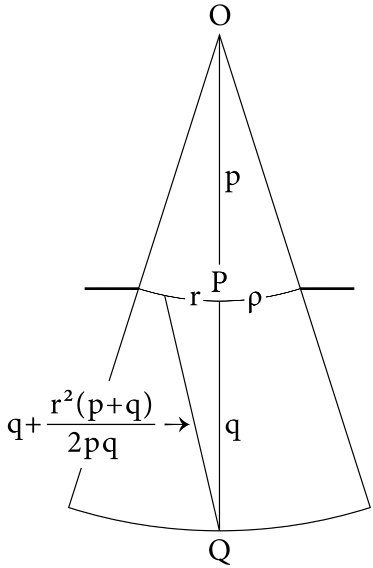
Met nadruk wijs ik erop dat de formulering van dit alternatieve scenario slechts mogelijk was door conform Huygens' kennelijke opvatting omtrent de pulsgedaante [2, pp.18-20; 3, pp.19-21], aan de pulsen een zekere tijdsduur toe te kennen. Met de ondanks Huygens' omzichtige formulering vrijwel algemeen verkozen fysisch oneigenlijke en mathematisch singuliere „oneindig scherpe" pulsen met tijdsduur mathematisch nul, zou zo'n scenario ondenkbaar zijn geweest.

Tot dusver zijn we er steeds van uitgegaan dat het licht zich vanuit de (puntvormige) lichtbron vrij kan uitbreiden. In het volgende hoofdstuk komt in termen van ons alternatieve scenario de invloed van obstakels zoals schermen of diafragma's op de voortplanting aan de orde.

7. Diffractie

In dit hoofdstuk komen in termen van de integraalversie van het principe van Huygens de implicaties aan de orde voor het geval dat de zich voortplantende golf door een ronde opening van een ondoorzichtig scherm is gevallen. Het blijkt dat het punt Q (zie figuur 5) alleen licht ontvangt uit een zone rond P (de niet door het scherm gestoorde zich vrij voortplantende golf) en uit een langs de schermrand gelegen zone (de door het scherm veroorzaakte diffractie). Dit kan beschouwd worden als een volstrekt denkbare vroege anticipatie op het resultaat van een strenge behandeling [19] van een soortgelijke situatie door A. Sommerfeld in 1896.

In het kader van ons alternatieve scenario gaan we de integraalversie van het principe van Huygens formuleren voor het geval dat de zich voortplantende golf een obstakel ontmoet in de vorm van een oneindig groot gedacht scherm met een opening die het licht doorlaat. Om het vooreerst eenvoudig te houden, kiezen we een rotatie-symmetrische situatie zoals door figuur 5 in doorsnede weergegeven. Het licht van de puntbron O bereikt het punt Q via een ronde opening waarvan de straal ρ veel kleiner is dan p en q. Op het sferische golffront door P is de uitwijking $u_P(t)$ als gevolg van de door O uitgezonden puls alleen van nul verschillend als $0 \leq t \leq T$ en $r \leq \rho$. Er moet nu worden geïntegreerd over de opening. We gaan eerst nog even uit van directe



Figuur 5

doorgifte van de secundairen. De uitdrukking voor de uitwijking in Q is dan

$$u_q(t)=M\int_0^{2\pi}\int_0^{\rho} u_p\left(t-\frac{q}{c}-\frac{r^2(p+q)}{2cpq}\right)d\varphi\, r\, dr =$$

$$=2\pi M\int_0^{\rho} u_p\left(t-\frac{q}{c}-\frac{r^2(p+q)}{2cpq}\right)r\, dr = 2\pi M\left(\int_0^{r_0}+\int_{r_0}^{\rho}\right) \quad (1)$$

Ook hier hebben we de nader te bepalen constante M.
De integratiegrens

$$r_0(t)=\sqrt{2cpq\frac{t-\frac{q}{c}}{p+q}}$$

is gelijk aan de straal van de cirkel met middelpunt P op welks omtrek op het tijdstip t het begin van de stoot vanuit Q „zichtbaar" is. Met de nieuwe variabele

$$x=t-\frac{q}{c}-\frac{r^2(p+q)}{2cpq}$$

krijgen we dan

$$u_q(t)=\frac{2\pi cpqM}{p+q}\left\{\int_0^{t-\frac{q}{c}} u_p(x)\,dx-\int_0^{t-\frac{q}{c}-\frac{\rho^2(p+q)}{2cpq}} u_p(x)\,dx\right\} \qquad (2)$$

Vervanging van $u_p(x)$ door $\partial u_p(x)/\partial t$ en substitutie van $1/2\pi qc$ voor M geeft tenslotte:

$$u_q(t)=\frac{p}{p+q}u_p\left(t-\frac{q}{c}\right)-\frac{p}{p+q}u_p\left(t-\frac{q}{c}-\frac{\rho^2(p+q)}{2cpq}\right) \qquad (3)$$

Dit resultaat is geldig voor elke waarde van de pulsduur T.

De golf levert dus in het punt Q twee gelijke maar tegengestelde bijdragen:

$$u_{q1}(t) = \frac{p}{p+q}\, u_p\left(t - \frac{q}{c}\right) \qquad (4)$$

$$u_{q2}(t) = \frac{p}{p+q}\, u_p\left(t - \frac{q}{c} - \frac{\rho^2(p+q)}{2cpq}\right) \qquad (5)$$

Als u_p een kortdurende enkelvoudige puls is waarvoor

$$T < \frac{\rho^2(p+q)}{2cpq}$$

dan overlappen zij elkaar niet. De eerste bijdrage u_{q1} herkennen we als de puls die de zich vrij (d.w.z. ongehinderd door het scherm) voortplantende golf in Q teweeg brengt via de secundairen uit het zich vanuit P uitbreidende schijfgebied. Die puls eindigt op het moment dat voor Q in P het einde van de puls verschijnt. Vanaf dat moment gaat de expanderende schijf verder als een expanderend ringgebied waarvan de netto bijdrage nul is zodat Q dan dus niets meer „ziet". Dat blijft zo totdat een tijd

$$\frac{\rho^2(p+q)}{2cpq} - T$$

later de ring achter het scherm begint te verdwijnen, waarbij dan het nog niet verdwenen gedeelte de bijdrage tot de diffractiepuls u_{q2} levert. Die bijdrage is dus uitsluitend afkomstig uit de zone begrensd door de schermrand (straal ρ) en een kleinere cirkel waarvan de punten een afstand cT dichterbij Q liggen

(straal $\rho - \frac{pqcT}{(p+q)\rho}$).

Als u_p een harmonische golf is wordt de situatie minder transparant omdat u_{q1} en u_{q2} elkaar nu volledig overlappen en in Q resulteren tot een harmonische golf waaruit niet meer eenduidig valt op te maken wat daarvan de oorspronkelijke componenten zijn geweest[18)]. Een discussie, louter in termen van Fresnelzones kan in dezen geen helderheid brengen omdat zoals we in het vorige hoofdstuk zagen, de tijd daarbij slechts *modulo* T is gedefinieerd. In het kader van zo'n discussie representeert het totale effect in Q de bijdrage van de hele opening, nu dus inclusief de diffractie. Maar precies zoals een redenering in dit kader de plaats van herkomst van de zich vrij voortplantende golf duister liet, geldt dat nu ook voor de diffractie. Het zal duidelijk zijn dat ook hier met een redenering waarin door de harmonische golf op te vatten als een reeks afwisselend positieve en negatieve pulsen, aan de tijd een volwaardige rol kan worden toebedeeld. Dat leidt dan tot het inzicht dat gezien vanuit Q de eerste bijdrage u_{q1} een harmonische golf is, afkomstig uit een gebied rond P, overeenkomend met de eerste Fresnelzone en de tweede bijdrage u_{q2}, de diffractie dus, eveneens een harmonische golf afkomstig uit het ringgebied dat overeenkomt met een aan de schermrand grenzende (volledige) Fresnelzone. In het tussengelegen gebied vertoont de gedifferentieerde puls zich aan Q altijd in zijn volle omvang en levert dan dus een netto bijdrage nul. Q ontvangt uit dat gebied dus geen licht. Dit resultaat kan worden beschouwd als een alleszins denkbare vroege anticipatie op dat van A. Sommerfeld [19], die in 1896 met een strenge behandeling van de diffractie aan een perfect geleidend scherm met rechte rand tot de conclusie kwam dat het diffractielicht afkomstig is uit een langs de schermrand gelegen zone. Daarbij was niet, zoals men zou kunnen vermoeden, de sophisticated behandeling van de invloed van het schermmateriaal debet aan die conclusie. Inderdaad kwam Sommerfeld zelf ook al met veel minder diepgravende middelen tot hetzelfde resultaat (zie „Born & Wolf" [17, p.553]).

In het voorgaande hebben we omwille van de eenvoud gekozen voor een rotatie-symmetrische situatie waarvoor de integratie over φ triviaal kon blijven. De meer algemene situatie waar ook de opening een willekeurige vorm kan hebben komt nog ter sprake. Maar eerst zullen we in het volgende hoofdstuk zien wat het alternatieve scenario in het voorgaande heeft opgeleverd, in het bijzonder ten aanzien van de vermeende fundamentele rol van de periodiciteit.

8. Nabeschouwing en conclusies

Mijn opstel was in de eerste plaats bedoeld om af te rekenen met de tot mythe uitgegroeide misvatting, dat het falen (in het bijzonder m.b.t. de rechtlijnige voortplanting) van een golfvoortplantings-model volgens de oorspronkelijke formulering van het principe van Huygens, geheel moet worden toegeschreven aan het ontbreken van periodiciteit in de voor die formulering gehanteerde golfgedaante en dat überhaupt voor een zinvolle kwantitatieve uitwerking van dat principe, de vervanging van Huygens' pulsreeks door een harmonische (althans periodieke) golf absoluut noodzakelijk zou zijn, dit in verband met het interferentie-principe van Young als vermeend essentieel geacht attribuut van zo'n uitwerking.

Als standaardargument tegen Huygens' oorspronkelijke formulering van zijn principe als adequate grondslag voor een deugdelijk golfvoortplantings-model, wordt gewoonlijk diens onvermogen tot een bevredigende verklaring van de rechtlijnige voortplanting aangevoerd. Hierbij rijst natuurlijk de belangrijke vraag of met die formulering zo'n verklaring überhaupt mogelijk was geweest. Een afdoend antwoord liet twee eeuwen op zich wachten. Pas in 1869 toonde de Franse fysicus Verdet met een ingenieuze redenering aan [4] dat golfvoortplanting volgens het principe van Huygens in zijn oorspronkelijke formulering geen rechtlijnige voortplanting kent (zie appendix 1 voor Verdet's originele tekst en de implicaties van een versie daarvan voor een denkbeeldige twee-dimensionale situatie). Verdet is ontegenzeggelijk de eerste die het falen van het principe van Huygens t.a.v. de rechtlijnige voortplanting overtuigend heeft aangetoond. Essentieel is daarbij dat hij het principe van Huygens—terecht uiteraard—als driedimensionaal voortplantingsmodel heeft behandeld. Maar het bewijs, hoewel volkomen correct, is anachronistisch omdat er enige infinitesimaalrekening bij nodig was, dit laatste wegens de door Verdet gekozen oneindig scherpe pulsvorm. Op zichzelf is er niets tegen om oude wetenschap met nieuwe kennis te onderzoeken. Echter, de door Verdet verkozen pulsduur—de fysisch oneigenlijke waarde mathematisch exact nul—voert via een weinig doorzichtige redenering tot een al even ondoorzichtig resultaat dat zich niet voor verdere uitwerking leent en dat is een ernstig bezwaar. Hier moeten we vaststellen dat Verdet (en met hem vele latere critici van Huygens) op het punt van de pulsduur weinig rekening heeft gehouden met Huygens' zorgvuldige formulering. Uit diens tekst namelijk, blijkt weliswaar dat hem kortdurende pulsen voor ogen stonden, maar van een pulsduur mathematisch nul is nergens sprake. Integendeel: zoals we hebben gezien in hoofdstuk 5, vermijdt hij door een passende woordkeuze de fysisch oneigenlijke situatie waartoe een rigoureus meetkundige beschrijving van het voortplantingsproces in termen van oneindig scherpe pulsen zou hebben geleid. Alle reden dus om voor de analyse van het probleem van de rechtlijnige voortplanting bij Huygens, uit te gaan van een puls met een weliswaar kleine, doch van nul verschillende tijdsduur. In hoofdstuk 5 zagen we hoe dan met elementaire middelen zonder anachronistische wiskunde een resultaat kan worden verkregen dat in tegenstelling tot dat van Verdet, aanschouwelijk maakt hoe volgens het principe van Huygens de golfvoortplanting in zijn werk gaat en we vonden inderdaad bevestiging van het falen van Huygens' voortplantingsmodel t.a.v. de rechtlijnige voortplanting. Echter, belangrijker nog, ook werd nu duidelijk dat afgezien van dit specifieke onvermogen t.a.v. van de stralenoptica, dat model gezien als puur golf-voortplantingsmodel intrinsiek ondeugdelijk is omdat het geen behoud van golfgedaante kent: de zich voortplantende puls verandert van gedaante en krijgt daarbij een

„staart" [19]. (Overigens kent zoals we in hoofdstuk 6 zagen, ook Fresnel's versie van het Principe geen behoud van golfvorm: de gedaanteverandering openbaart zich daar als een fase-achterstand van $\pi/2$).

Er heeft zich een voornamelijk onder wetenschapshistorici heersende consensus ontwikkeld die het falen van Huygens' voortplantingsmodel toeschrijft aan het ontbreken van periodiciteit. De opvatting dat periodiciteit onmisbaar is, kennelijk ingegeven door de sleutelrol die de (quasi)-harmonische golfgedaante heeft gespeeld in Fresnel's werk, is inderdaad terecht voorzover het diens uiterst succesvolle onderzoek aan de door interferentie veroorzaakte diffractie-structuren betreft omdat zoals we weten, voor het optreden van zulke stationaire intensiteits-patronen de harmonische golfvorm een voorwaarde is. Maar we hebben gezien dat als het onderzoek niet specifiek gericht is op die diffractie-structuren, maar primair op de basis-eigenschappen van de golfvoortplanting in de lege ruimte, de geijkte behandeling in termen van sinusgolven slechts een zeer beperkt inzicht heeft opgeleverd. Er wordt niet onthuld welke gebieden van het golffront bijdragen tot het licht in een verderop gelegen punt. We noemen hier bijvoorbeeld de in hoofdstuk 6 besproken paradox dat de eerste Fresnelzone het dubbele van de totale bijdrage zou leveren zonder dat de bijdrage die nodig is om het teveel geleverde door destructieve interferentie teniet te doen kan worden aangewezen. Het is opmerkelijk dat zo'n volstrekt onaanvaardbare ongerijmdheid in feite een bevredigende verklaring van de rechtlijnige voortplanting voor Fresnel's model zo lang in de weg heeft kunnen staan.

Terug nu naar de voortplanting van niet-periodieke golven. In hoofdstuk 6 bleek uit een analyse van Huygens' model voor de voortplanting van pulsgolven aan de hand van een integraalvoorstelling die—ook naar maatstaven van begin 19e eeuw—als een volstrekt elementaire toepassing van integraalrekening kan worden beschouwd, dat in dat model de zich voortplantende pulsgolf een integratieproces ondergaat. Dat dwingt tot de conclusie dat voor het verkrijgen van behoud van golfgedaante, moet worden gepostuleerd dat de secundaire golven niet, zoals oorspronkelijk stilzwijgend was aangenomen, opgevat moeten worden als een directe voortzetting van de primaire golf, maar van de afgeleide daarvan naar de tijd. Een simpele redenering in termen van de aldus gemodificeerde vorm van de gepostuleerde secundairen[20)] leert dan dat het gebied waar het licht vandaan komt, beperkt blijft tot een centrale schijf waarvan de straal evenredig is met de wortel uit de pulsduur en die precies de totale lichthoeveelheid—en nu dus niet meer dan dat—levert. Er is dus bij benadering rechtlijnige voortplanting en die benadering is beter naarmate de pulsduur kleiner is. Voor oneindig scherpe pulsen is er dus ideale geometrische optica. We hebben gezien dat aan de hand van dit resultaat nu ook voor een harmonische golf een bevredigende verklaring van de rechtlijnige voortplanting kan worden verkregen door deze golf niet zoals gebruikelijk, op te vatten als een onverbrekelijk geheel, maar als een reeks van afwisselend positieve en negatieve individuele pulsen. Ook hier is er een centrale schijf als enige oorsprong van al het licht en dat blijkt dan de eerste Fresnel-zone te zijn. De paradoxale factor twee is verdwenen en het wordt ook duidelijk hoe die paradox in het reguliere scenario heeft kunnen ontstaan. Het is wel ironisch dat in het reguliere scenario de fixatie op de absoluut onmisbaar geachte streng periodieke golfvorm een afdoende verklaring van de rechtlijnige voortplanting bijna honderd jaar in de weg heeft gestaan en dat het juist een van periodieke (of zelfs maar niet periodieke) herhaling gespeende enkelvoudige puls blijkt te zijn

die via een simpele integratie het nodige inzicht in het voortplantingsmechanisme had kunnen opleveren. Ook nu nog heerst vrij algemeen de opvatting als zou Huygens' formulering van zijn principe wegens het ontbreken van periodicieit fundamenteel ongeschikt zijn voor nadere uitwerking. Om de geldigheid van deze opvatting te toetsen is het noodzakelijk onderscheid maken tussen de situatie ten tijde van Huygens zelf en die ten tijde van Fresnel, ruim honderd jaar later dus. Ten aanzien van het eerste geval stelt de scheidende Delftse hoogleraar in de optica Joseph Braat in zijn uittreerede [22, p.2]: „De golftheorie van Huygens was conceptueel interessant maar gaf geen aangrijpingspunten voor kwantitatieve uitwerking en dat was een van de redenen dat zijn ideeën relatief onderbelicht bleven." Inderdaad heeft het na het verschijnen van *Traité de la Lumière* meer dan een eeuw moeten duren voordat Fresnel, gebruikmakend van een met behulp van de inmiddels ingeburgerde infinitesimaal-rekening, tot een bevredigende beschrijving van het sommerings-proces van de secundaire golven kon komen en met de aldus verkregen kwantitatieve versie van het principe van Huygens, een beslissende wending aan zijn stagnerend diffractie-onderzoek wist te geven.
Dat Huygens' ideeën nauwelijks bijval kregen kan men gedeeltelijk toeschrijven aan de negatieve invloed die Newton's autoriteit—vooral destijds—op de meningsvorming heeft gehad 21). Maar hoe dit ook zij, het staat vast dat het Fresnel is geweest die het Principe van Huygens weer onder de aandacht heeft gebracht. Braat hierover: „Feit is dat de autoriteit van Newton weinig heel heeft gelaten van de golftheorie van Huygens waardoor deze vrijwel in de vergetelheid raakte. Hetzelfde is, door de niet aflatende negatieve bemoeienis van Newton gebeurd met het werk van bijvoorbeeld Robert Hooke. Beiden hebben latere verdedigers nodig gehad om de plaats terug te winnen

die hen objectief toekomt. In het geval van Huygens kwam de redding van Fresnel, zo'n honderddertig jaar na het verschijnen van *Traité de la Lumière.*"
Jammer genoeg laat Braat het hierbij en gaat niet in op het hoe en het wat van deze „reddingsoperatie". Aangezien het hier één van de belangrijkste momenten in de ontwikkeling van de golfoptica betreft, is een nadere beschouwing op zijn plaats. We vatten dus de lotgevallen van de oerversie van het principe van Huygens nog even samen. Aangaande de rol van Fresnel is het evident dat hij zich door de adoptie van Huygens' ideeën in 1819 definitief emancipeerde van de hegemonie der lichtstralen, zich daarbij het misprijzen van invloedrijke lichtstraaladepten[22)] op de hals halend en het is zeker niet overdreven hem op grond daarvan als redder èn verdediger van Huygens te beschouwen. Maar wat hij kwantitatief heeft uitgewerkt is niet, zoals vaak wordt gedacht, de oerversie van het principe van Huygens. Fresnel's doel namelijk, was niet primair de uitwerking van Huygens' oorspronkelijke formulering. Hij wilde zich Huygens' ideeën ten nutte maken ten behoeve van zijn eigen onderzoek aan diffractie-patronen en schroomde daarbij niet de enkelvoudige *onde principale* van Huygens' oorspronkelijke formulering te vervangen door een harmonische golf[23)]. Maar uit niets blijkt dat Fresnel aan de invoering van die golfgedaante naast de evident pragmatische ook nog een fundamentele betekenis hechtte[24)]. In 1869 komt Huygens' versie weer aan de orde als Émile Verdet het reeds lang bestaande vermoeden bevestigt dat het door die oerversie gedefinieerde voortplantingsmodel geen rechtlijnige voortplanting kent. Echter, zoals we in hoofdstuk 5 al zagen, houdt hij zijn redenering aan de hand van pulsen met de fysisch oneigenlijke tijdsduur exact nul, kennelijk menend zijn bewijs daarmee in de passende historische context te plaatsen. Maar als dat wer-

kelijk zijn bedoeling was, dan is die keuze voor de pulsgedaante juist de verkeerde geweest, aangezien Huygens met zijn zorgvuldige formulering duidelijk blijk geeft de fysisch oneigenlijke situatie die een pulsduur exact nul met zich mee zou brengen, te willen vermijden. Hoe dan ook, Verdet's uitwerking doet geen recht aan een subtiel maar cruciaal detail van Huygens' formulering en kan dus evenmin als die van Fresnel gelden als een tekstgetrouwe kwantificering van het principe van Huygens. Opmerkelijk genoeg wordt in de literatuur nergens gerept van het bestaan of zelfs maar de wenselijkheid van zo'n correcte uitwerking. Het leek mij evident dat dit collectieve verzuim om herstel vraagt, en dat niet alleen als daad van eenvoudige rechtvaardigheid jegens Huygens, maar uiteraard vooral ook om te onderzoeken in hoeverre dat verzuim van invloed is geweest op de ontwikkeling van het inzicht in de golfvoortplanting.

Concluderend

Zoals we in hoofdstuk 5 zagen vergt de directe kwantificering van Huygens' formulering niet meer dan enige elementaire integraalrekening, waarbij die formulering als schoolvoorbeeld mag gelden van een verbaal ingeklede integraalvoorstelling.
Vanaf het begin van de negentiende eeuw was het ongetwijfeld al mogelijk geweest om met die naar de eisen van de toen inmiddels ingeburgerde integraalrekening opgewaardeerde, en vervolgens t.a.v. het postulaat nader gepreciseerde versie van Huygens' oorspronkelijke formulering, tot het in dit opstel geformuleerde voortplantings- annex diffractie-model te komen. Dat model zou dan dus niet alleen hebben voorzien in een bevredigende verklaring van de rechtlijnige voortplanting voor elke al of niet periodieke golfgedaante, maar tevens ten aanzien van voortplanting en diffractie inzicht hebben opgeleverd dat in het reguliere scenario tot 1896 [19] verborgen bleef. Ironisch

genoeg is het daar juist de persistente preoccupatie met de vermeend fundamenteel noodzakelijke periodiciteit geweest die de weg naar dat inzicht bijna een eeuw lang heeft versperd. Dat het in de fysische gemeenschap nooit tot enig initiatief is gekomen om tot zo'n directe kwantificering van Huygens' oorspronkelijke voortplantingsmodel te geraken heeft mogelijk te maken met de stormachtige ontwikkeling van de golf-optica die door de invoering van de harmonische golf werd ontketend. Maar het succes met deze golfvorm, hoe overweldigend ook, had een bezinning op de mogelijkheden van Huygens' enkelvoudige puls niet in de weg mogen staan.
Onder wetenschaps-historici wordt de periodiciteits-doctrine vrijwel unaniem aangehangen en—meer expliciet nog dan door fysici—met veelal sterk apodictische uitspraken uitgedragen. Dat zal blijken in Appendix 2.

APPENDIX 1

Het bewijs van Verdet

12. **Critique de la théorie de Huyghens.** — Le principe des ondes enveloppes, sur lequel est fondée toute la théorie de Huyghens, est incontestablement vrai en lui-même, car tous les phénomènes de la réflexion et de la réfraction simple ou double en fournissent une démonstration *a posteriori*; aussi, ce que nous nous proposons d'examiner maintenant, ce n'est pas la valeur de ce principe, mais bien la rigueur des aperçus par lesquels Huyghens a cru le démontrer. Afin d'éviter toute complication dans les calculs, nous ne considérerons que des ondes planes, ce qui est suffisant pour le but que nous avons en vue. Soient donc (fig. 16) deux plans AB,

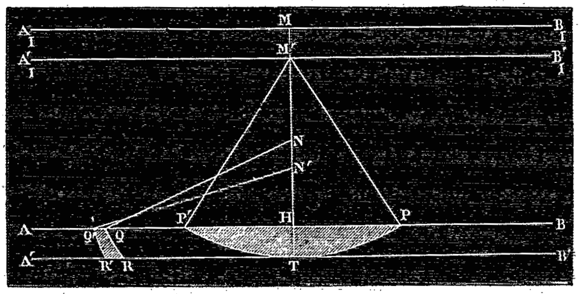


Fig. 16.

A'B', parallèles et situés à une distance infiniment petite h l'un de l'autre. Imaginons que chacun des points de la couche comprise entre ces deux plans devienne le centre d'une onde sphérique élémentaire ; au bout d'un temps t, si la manière de voir de Huyghens est exacte, le mouvement lumineux devra être circonscrit dans une région comprise entre deux plans infiniment voisins A_1B_1 et $A'_1B'_1$, situés respectivement à une distance des plans AB et A'B' égale à vt, v étant la vitesse de propagation de la lumière dans le milieu : nous désignerons cette distance par R. Ceci posé, menons une droite MT perpendiculaire aux plans A_1B_1 et $A'_1B'_1$, et cherchons quels sont les points qui, à l'instant considéré, envoient des impulsions lumineuses à la portion MM' de la droite qui est limitée par ces deux plans. Ces points sont évidemment compris dans la calotte sphérique PTP' que le plan AB retranche de la sphère décrite du point M' comme centre avec un rayon égal à R. Prenons maintenant sur la perpendiculaire MT, mais en dehors de la région $A_1B_1A_1'B_1'$, un élément NN' dont la longueur soit égale à MM', c'est-à-dire à h. Il est facile de délimiter la région où sont compris les points qui envoient des impulsions lumineuses en NN' au moment dont il s'agit : il suffit pour cela de décrire, des points N et N' comme centres, des sphères de rayon R, et de considérer le solide compris entre les surfaces de ces deux sphères et entre les deux plans AB, A'B', solide qui peut être regardé comme engendré par la rotation de la figure QQ'RR', qui diffère infiniment peu d'un parallélogramme, autour de la droite MT. Pour que les raisonnements de Huyghens fussent rigoureux, il faudrait que ce second volume fût infiniment petit par rapport à celui de la calotte sphérique PTP'. Or c'est ce qui n'a pas lieu. On voit en effet immédiatement, en remarquant que l'on a

$$\overline{PH}^2 = h\,(2R - h),$$

que le volume de la calotte sphérique est égal à

$$\pi h (2R - h)\frac{h}{3},$$

ou, en négligeant le terme en h^3, à

$$\frac{2\pi h^2 R}{3}.$$

Quant au second volume, il s'obtiendra, d'après le théorème de Guldin, en multipliant l'aire QQ'RR' par la circonférence que décrit le centre de gravité de cette aire. Or on a, en représentant la distance MN par d,

$$QQ' = HQ' - HQ = \sqrt{R^2 - (R - d - h)^2} - \sqrt{R^2 - (R - d)^2},$$

d'où, en remarquant que QQ' peut être considérée comme la différentielle de $\sqrt{R^2 - (R - d)^2}$,

$$QQ' = \frac{(R - d)h}{\sqrt{R^2 - (R - d)^2}};$$

il vient ainsi

$$\text{aire } QQ'RR' = \frac{(R-d)h^2}{\sqrt{R^2-(R-d)^2}},$$

$$\text{circonf. } HQ = 2\pi\sqrt{R^2-(R-d)^2}.$$

Le volume cherché a par conséquent pour expression

$$2\pi(R-d)h^2,$$

et son rapport au volume de la calotte sphérique est égal à

$$\frac{3(R-d)}{R},$$

quantité finie, à moins que $R-d$ ne soit infiniment petit, c'est-à-dire à moins que l'élément NN' ne soit infiniment voisin de AB. Le raisonnement de Huyghens, uniquement fondé sur la condensation des ondes élémentaires dans le voisinage de l'onde enveloppe, est donc insuffisant pour prouver qu'il n'y a pas de mouvement sensible à l'intérieur de cette enveloppe.

Tant que l'on se borne à considérer la propagation d'un ébranlement lumineux dans un milieu homogène, on peut tourner la difficulté. Dans ce cas il est évident, en effet, qu'il se produit une onde sphérique dont le rayon va sans cesse en augmentant : il n'est pas moins évident que cette onde, dans une quelconque de ses positions, peut être regardée comme résultant de la composition des ondes sphériques élémentaires émanées des différents points d'une onde antécédente. Ces deux manières d'envisager la propagation de la même onde ne peuvent s'accorder qu'en admettant que les ondes élémentaires ne sont pas constituées de la même manière sur toute leur surface, que, par exemple, sur l'onde élémentaire émanée d'un point quelconque d'une onde principale, l'intensité du mouvement vibratoire va en décroissant à partir du point où cette onde élémentaire coupe la normale menée par son centre à l'onde principale. Cette supposition n'a du reste rien qui soit difficile à comprendre : si les vibrations lumineuses sont longitudinales, c'est-à-dire parallèles aux rayons, on conçoit aisément que le mouvement envoyé par un des éléments de l'onde ait sa plus grande intensité dans la direc-

Omdat de laatste uitdrukking op p.40 [in de nummering van de uitgave van Verdet] constant ongelijk nul blijft als *h* naar nul gaat, concludeert Verdet terecht dat er ter plaatse van de omhullende geen concentratie plaatsvindt. Maar als Verdet's redenering in twee dimensies wordt gehouden, verschijnt er in de overeenkomstige uitdrukking een factor $h^{1/2}$. In dat geval is er dus wel concentratie.

Vrij stralende puntbron

Het in hoofdstuk 6 voorgestelde model voor de vrije golfvoortplanting vanuit een puntbron kon wegens de voor de verantwoording van dat model noodzakelijke benaderingen uiteraard geen uitsluitsel worden verkregen over de bijdrage van het niet bij de redenering betrokken perifere gebied van het golffront. We zullen nu laten zien hoe dit wel mogelijk is met een „voortplantingsrecept" dat we ontlenen aan Kirchhoff's strenge formulering van het principe van Huygens [23, p.1039; 17, p.374]. De algemene vorm van die formulering vinden we als „Het Theorema van Kirchhoff" op p.377 van ref. 17 (eq13). Voor ons doel schrijven we dit theorema als

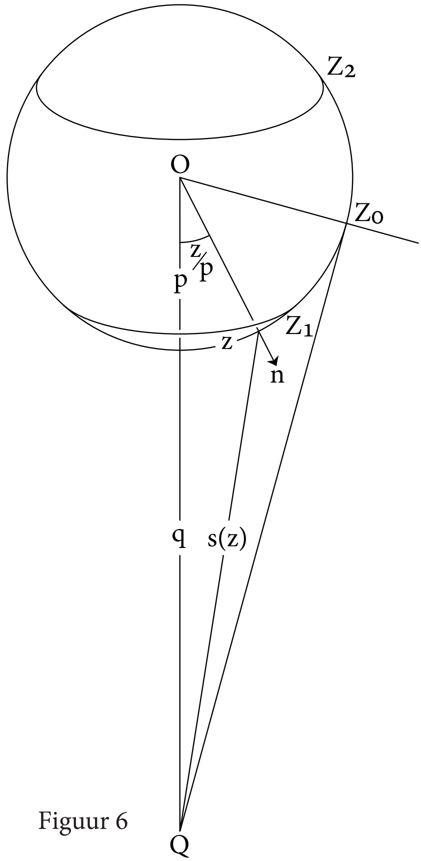
$$U_q(t) = \frac{1}{4\pi}\int_S \left\{ [U]\frac{\partial(\frac{1}{s})}{\partial n} - \frac{1}{cs}\frac{\partial s}{\partial n}\left[\frac{\partial U}{\partial t}\right] - \frac{1}{s}\left[\frac{\partial U}{\partial n}\right] \right\} dS \qquad (1)$$

De vierkante haken geven aan dat de functiewaarden die Q op de tijd t „ziet" dateren uit de tijd t – s/c. s is de afstand van het oppervlakte-element dS tot Q;

> n is de normaal op dS; de positieve richting van n geeft aan naar welke van de twee gebieden ter weerszijden van het oppervlak S de golf wordt voortgezet.

Van de (vooralsnog als korte puls gedachte) uitwijking U en haar afgeleide naar de tijd geven de eerste twee termen van de integrand uitsluitend waarden aan gebaseerd op parameters in het oppervlak S, dit in tegenstelling tot de derde term waar het verloop van U langs de normaal een rol speelt.

In figuur 6 is het middelpunt O van de bol met straal p de bron van een pulsgolf die overal op het boloppervlak een uitwijking U(t) teweeg brengt. Met de door (1) uitgedrukte strenge formulering van het principe van Huygens berekenen we het effect U_q van die golf in Q door integratie over het totale boloppervlak.



Figuur 6

Aangezien $s=\sqrt{(p+q)^2+p^2-2(p+q)p\cos\left(\frac{z}{p}\right)}$,

is $$s(p+n)=\sqrt{(p+q)^2+(p+n)^2-2(p+q)(p+n)\cos\left(\frac{z}{p}\right)} \quad (2)$$

Voor de eerste twee termen van de integrand vinden we dan:

$$\frac{-(p-(p+q)\cos\left(\frac{z}{p}\right)}{s^3}[U] \quad (3) \qquad -\frac{1}{cs}\frac{(p-(p+q)\cos\left(\frac{z}{p}\right)}{s}\left[\frac{\partial U}{\partial t}\right] \quad (4)$$

De derde term van de integrand is bepalend voor de voortplantingsrichting van de golf. Aangezien het hier om een divergerende golf gaat, moet gelden:

$$[U(t,n)]=\frac{p}{p+n}[U\bigl(t-\tfrac{n}{c}\bigr)].$$

Wegens deze voorwaarde luidt de derde term:

$$\tfrac{1}{ps}[U]+\tfrac{1}{cs}\Bigl[\frac{\partial U}{\partial t}\Bigr] \qquad (5)$$

Uit (3), (4) en (5) volgen voor de totale bijdragen I(U) en I(∂U/∂t) van U tot de integrand:

$$I(U)=\frac{1}{ps^3}\Bigl((p+q)^2-(p+q)p\cos\bigl(\tfrac{z}{p}\bigr)\Bigr)[U] \qquad (6)$$

en $$I\Bigl(\frac{\partial U}{\partial t}\Bigr)=-\frac{1}{cs}\Bigl(\frac{p-(p+q)\cos\bigl(\frac{z}{p}\bigr)}{s}-1\Bigr)\Bigl[\frac{\partial U}{\partial t}\Bigr]$$

Teneinde de parameter t kwijt te raken vervangen we $\bigl[\frac{\partial U}{\partial t}\bigr]$ door

$$\Bigl[\frac{\partial U}{\partial z}\Bigr]\Bigl(-\frac{dz}{dt}\Bigr)=-\frac{\bigl[\frac{\partial U}{\partial z}\bigr]cs}{(p+q)\sin\bigl(\frac{z}{p}\bigr)}$$ Voor $I\bigl(\frac{\partial U}{\partial t}\bigr)$ vinden we dan

$$I\Bigl(\frac{\partial U}{\partial t}\Bigr)=\frac{1}{p\sin\bigl(\frac{z}{p}\bigr)}\Bigl(\frac{(p+q)\cos\bigl(\frac{z}{p}\bigr)-p}{s}-1\Bigr)\Bigl[\frac{\partial U}{\partial z}\Bigr] \qquad (7)$$

We kiezen z als integratie-variabele. Voor het oppervlakte-element dS van (1) schrijven we $2\pi p\sin(z/p)dz$ en vinden voor de integraal over het ringgebied tussen z_1 en z_2:

$$U_q(z_1,z_2)=\int_{z_1}^{z_2}\Bigl(W[U]+V\Bigl[\frac{\partial U}{\partial z}\Bigr]\Bigr)dz \qquad (8)$$

met $$V = -\frac{p}{2(p+q)}\left(\frac{(p+q)\cos\left(\frac{z}{p}\right) - p}{s} + 1\right) \qquad (9)$$

en $$W = \frac{p+q}{2s^3}\sin\left(\frac{z}{p}\right)\left(p+q-p\cos\left(\frac{z}{p}\right)\right) \qquad (10)$$

Indachtig de in hoofdstuk 6 geformuleerde integraalvorm van het principe van Huygens in paraxiale benadering, ligt hier de vraag voor de hand of nu ook de exacte formulering (8) evenals die benadering een totale differentiaal als integrand heeft. Dat is inderdaad het geval. Nadere beschouwing van (9) en (10) leert namelijk dat $W = \partial V/\partial z$

We krijgen: $$U_q(z_1,z_2) = \int_{z_1}^{z_2}\left(\frac{\partial V}{\partial z}[U] + V\left[\frac{\partial U}{\partial z}\right]\right)dz = \Big|_{[U](z_1)V(z_1)}^{[U](z_2)V(z_2)}$$

Dus:

$$U_q(z_1,z_2) = \frac{p}{(p+q)}\left\{Sch(z_1)U(t-\frac{s_1}{c}) - Sch(z_2)U(t-\frac{s_2}{c})\right\} \qquad (11)$$

Sch(z) is de „scheefheidsfactor"$= \frac{1}{2}\left\{\frac{(p+q)\cos\left(\frac{z}{p}\right) - p}{s} + 1\right\}$

Voor de zich vrij voortplantende golf moeten we integreren van $z_1 = 0$ tot $z_2 = \pi p$

Met (11) vinden we dan:

$$U_q(t) = \frac{p}{p+q}U(t-\frac{q}{c}) \qquad (12)$$

Dit resultaat bevestigt de geldigheid van de gelijkluidende uitdrukking (5) in hoofdstuk 6.

Maar er is wel een belangrijk verschil: Berustte de oorspronkelijke uitdrukking (5) op het nog hypothetische principe van

Huygens' secundaire golven (inclusief de onontkoombare nadere precisering), waarbij de bijdragen van het perifere gebied van het golffront niet in aanmerking werden genomen, uitdrukking (12) komt voort uit een met adequate wiskundige middelen verkregen strenge formulering van dat principe en kan wegens de scheefheidsfactor worden gezien als de exacte extrapolatie van de paraxiale benadering (5) naar het perifere gebied van het golffront.

APPENDIX 2

E.J. Dijksterhuis

In zijn beroemde werk „De Mechanisering van het Wereldbeeld” (1950) [11] behandelt E.J. Dijksterhuis in enkele paragrafen ook Huygens’ „*Traité de la Lumière*”[2]. Hij vermeldt dat nog steeds in natuurkundeleerboeken reflectie en breking van het licht aan de hand van het Principe van Huygens worden verklaard. Maar opmerkelijk genoeg negeert hij de belangrijkste episode uit de lange geschiedenis van dat principe namelijk de uiteindelijke adoptie door Fresnel in 1818, waardoor zoals bekend een stormachtige ontwikkeling van de golfoptica op gang kwam [7]. Werd er in de voorafgaande jaren nog aangemodderd met een moeilijk te hanteren hybride golfvoortplantingsmodel waarbij de voortplantingsfunctie bij de lichtstralen werd gelegd, nu legde ook Fresnel in navolging van Huygens’ oorspronkelijke inmiddels meer dan honderd jaar oude concept het primaat juist bij de secundaire golven en werden evenals bij Huygens, lichtstralen gedegradeerd tot een uit de superpositie-eigenschappen van secundaire golven afgeleid verschijnsel [ref. 7, p.5]. Blijkbaar heeft Dijksterhuis dit aspect van het principe, althans het belang ervan, niet onderkend. De depreciërende invloed van deze omissie op de reputatie van Huygens wordt nog versterkt als Dijksterhuis vervolgens dat principe aanduidt als „slechts een inleiding” op diens behandeling van de dubbele breking door kalkspaat. Dat dit een ernstige onderschatting is van het belang dat ook Huygens zelf aan zijn principe hechtte blijkt uit een brief aan Leibniz waarin hij zijn resultaten met kalkspaat aanduidt als „*experimentum crucis*” voor de geldigheid van de ideeën neergelegd in zijn principe. Tenslotte een aspect van Huygens’ formulering van het principe, door Dijksterhuis beschouwd als een fundamenteel gebrek: het ontbreken van begrippen als trilling, longitudinale en transversale golf, golflengte en frequentie, de basiselementen dus van de trillingstheorie van het licht. Als voorbeeld van dat aspect kiest Dijksterhuis het polarisatiebegrip. Het is bekend dat Huygens bij de studie van de dubbele breking door twee in serie geplaatste kalkspaatkristallen opmerkte dat de oriëntatie van het tweede kristal op een voor hem onbegrijpelijke manier van invloed was op de werking daarvan op de uit het eerste kristal tredende stralen. Dat dit gedrag hem een raadsel was is niet verwonderlijk want het is evident dat voor (*avant la lettre*) longitudinale stoten zo'n oriëntatiegevoeligheid ondenkbaar is. En aangezien Huygens kennelijk niet op het idee kwam dat het bij zijn stootgolven om dwars op de voortplantingsrichting staande stoten zou kunnen gaan, is hij niet de ontdekker van de polarisatie van het licht geworden. Speculatie over de vraag of Huygens met meer inspanning misschien toch op het goede idee had kunnen komen heeft natuurlijk geen enkele zin. Wel moet worden opgemerkt dat het mechanisme van onderling botsende deeltjes in Huygens' „vloeistofachtige" ethermodel allerminst geschikt lijkt voor de voortplanting van transversale stoten. Ook later deed zich zo'n probleem voor: om transversale golven te kunnen voortplanten zou de ijle lichtether zich moeten gedragen als een vaste stof. Maar hoe dan ook, de beslissende factor voor Huygens' onvermogen de verschijnselen te duiden was louter het missen van het concept van dwarse stoten. Dijksterhuis echter, stelt dat het begrip „polarisatie" onverbrekelijk samenhangt met de trillingstheorie. Hij baseert dat op het feit dat het 140 jaar latere polarisatieonderzoek plaatsvond in termen van de toen tot ontwikkeling gekomen trillingstheorie. Maar dat betekent natuurlijk niet dat zoals Dijksterhuis suggereert, Huygens destijds, om tot inzicht te geraken, de hele trillingstheorie inclusief het periodiciteitsconcept met de daarmee samenhangende begrippen frequentie en golflengte nodig zou hebben gehad. Voor de oplossing van zijn probleem zou Huygens aan de periodiciteit niets hebben gehad. Vervolgens komt nog in het bijzonder het ontbreken van periodiciteit in de opeenvolging van de door Huygens gepostuleerde stoten ter sprake. Over die stoten schrijft Dijksterhuis: „Huygens zegt uitdrukkelijk dat ze elkaar met ongelijke tussenpozen opvolgen". Met deze opmerking suggereert hij dat voor Huygens die onregelmatigheid essentieel zou zijn voor het functioneren van zijn gepostuleerd voortplantingsmodel, althans daarin een rol zou spelen en die suggestie wordt nog versterkt door de misplaatste toevoeging „uitdrukkelijk". Maar uit Huygens' tekst kan niet worden opgemaakt dat hij die onregelmatigheid postuleert. Het ligt veel meer voor de hand dat hij het als een gegeven beschouwde, voortvloeiend uit de onregelmatige onderlinge botsingen van de ether deeltjes in de lichtbron [ref. 2, p.15 ref. 3, p.17]. Dit sluit natuurlijk niet uit dat het gegeven onbedoeld toch een rol zou kunnen spelen in het voortplantingsmodel. Maar ook dat is niet het geval: met zijn principe formuleert Huygens namelijk het „voortplantingsrecept" voor elke stootgolf afzonderlijk. Op dat recept hebben de andere stootgolven van de reeks geen invloed. Daar bovendien zoals Huygens ons leert, alle golven zich voortplanten zonder elkaar te storen [ref. 2, pp.16, 20 ref. 3, pp.17, 21] (lineaire optica *avant la lettre*), is in tegenstelling tot de gangbare opvatting, voor de interpretatie van Huygens' formulering het al of niet periodiek zijn van zijn pulsreeks een irrelevant gegeven. Toch zullen we zien dat desondanks die onregelmatigheid steeds weer als een fundamentele tekortkoming wordt aangewezen. Het is duidelijk dat Dijksterhuis het ontbreken van periodiciteit als een fundamenteel beletsel ziet voor verdere ontwikkeling van Huygens' oerversie. Mogelijk was een sterke preoccupatie met dit denkbeeld voor Dijksterhuis de reden Huygens' betekenis voor die latere ontwikkelingen te negeren. Hoe heilig de periodiciteit voor hem was blijkt wel uit zijn nogal belerende, om niet te zeggen indoctrinerende slotzin waarin hij zijn lezers weliswaar toestaat van de golftheorie van Huygens te spreken, maar dan onder de voorwaarde dat men „in verband daarmee iedere gedachte aan periodiciteit verre houdt."

I. Bernard Cohen

In de preface voor een heruitgave van Newton's „*Opticks*" [11] brengt de vooraanstaande wetenschapshistoricus I. Bernard Cohen (Harvard, overleden 2003) ook Huygens' golftheorie ter sprake. Hij schrijft: „*Although Huygens had provided a brilliant method for constructing the wave front in the case of refraction or reflection, the waves he postulated were without the primary characteristic of a physical wave motion, i.e., periodicity*". Het laatste is een halve waarheid. Dat Huygens' golven geen periodiciteit kenden zal niemand betwisten, maar dat periodiciteit het hoofdkenmerk zou zijn van „echte" golven is een absurde gedachte. Hoofdkenmerk is namelijk dat er zich een beweging voortplant—via de botsende etherdeeltjes—zonder dat er transport van die deeltjes plaatsvindt. De aard van de beweging bepaalt het golftype: longitudinaal of transversaal, niet periodiek of periodiek en dat laatste al of niet harmonisch. Huygens' stoten, niet periodiek en *avant la lettre* longitudinaal, vertegenwoordigen een volkomen legitiem golfbegrip en verdienen het predikaat „golf" (fysische golfbeweging) evenzeer als de later door Young en Fresnel gehanteerde harmonische (aanvankelijk longitudinale, later transversale) golven. Cohen's fixatie op de periodiciteit is zo sterk dat hij meent zeker te weten dat Huygens zich genoodzaakt zag de periodiciteit te verwerpen om de geldigheid van zijn ideeën over de lichtvoortplanting te redden. Hij schrijft: „*In fact Huygens' denial of periodicity in his postulated light waves was an attempt to account for the possibility of a number of waves crossing each other without in any way interfering one with another*.". Deze bewering kan niet worden ontleend aan Huygens' tekst. Daar namelijk wordt weliswaar gesteld dat de stoten elkaar niet met regelmatige tussenpozen opvolgen maar uit niets blijkt dat Huygens die onregelmatigheid nodig achtte voor de geldigheid van zijn ideeën. Bij de bespreking van Dijksterhuis' visie kwam deze kwestie overigens al uitvoerig ter sprake. Aangezien in Huygens' uiteenzetting dus nergens sprake is van zoiets als een „periodiciteitsverbod" had Cohen zich moeten beperken tot het uitspreken van een vermoeden. Maar hij presenteert zijn bewering nochtans als vaststaand feit. Voor een historicus van professie is dat nogal wat. Blijft de vraag waarop hij die stelligheid baseert. Het lijkt erop dat een verkeerde interpretatie van het begrip „interferentie", in het bijzonder „destructieve interferentie" hem parten heeft gespeeld. In de *Traité* stelt Huygens de wisselwerking van elkaar doorkruisende golven twee maal aan de orde [ref. 2, p.16 en 20]. Op p.16 schrijft hij: „*Il ne faut pas au reste que cette prodigieuse quantité d'ondes, qui se traversent sans confusion, ny sans s'effacer les unes les autres, semble inconcevable; estant certain qu'une mesme particule de matière peut servir à plusieurs ondes, venant de divers costez, ou mesme de costez contraires; non seulement si elle est poussée par des coups qui s'entre-suivent prez a prez, mais mesme par ceux qui agissent sur elle en mesme instant; & cela à cause du mouvement, qui s'etend successivement*".

Op p.20: „*Une autre, & des plus merveilleuses preprietez de la lumière est que, quand il en vient de divers costez, ou mesme d'opposez, elles font leur effet l'une à travers sans aucun empéchement. D'ou vient aussi que par une mesme ouverture plusieurs spectateurs peuvent voir tout à la fois des objets differens, & que deux personnes se voyant en mesme instant les yeux l'un de l'autre. Or suivant ce qui este expliqué de l'action de la lumière, & comment les ondes ne se détruisent point, ny ne s'interrompent les unes les autres quand elles se croisent, ces effets que je viens de dire sont aisez à concevoir.*". Uit deze fragmenten blijkt geenszins dat Huygens, zoals Cohen denkt, ervan uitging dat zijn elkaar doorkruisende stootgolven niet met elkaar zouden interfereren. Integendeel, Huygens stelt juist dat elk etherdeeltje zijn voortplantingsfunctie simultaan uitoefent voor alle stootgolven waardoor het wordt getroffen, zelfs als meer dan één van die golven gelijktijdig op dat deeltje inwerken en hij postuleert nadrukkelijk dat daarbij de golven elkaar niet vernietigen, zelfs niet als hun invloeden op de etherdeeltjes elkaar teniet doen. Hij illustreert dat laatste [ref. 2, p.16] met een representatief gedachte-experiment waarbij in een rij gelijke elastische bollen (ongeveer) gelijktijdig aan weerszijden een stootgolf wordt geïnjecteerd. De bol op de plaats waar de tegengesteld lopende golven elkaar ontmoeten blijft in rust, maar beide golven vervolgen hun loop voorbij de ontmoetingsplaats. Het stilvallen van de beweging op de ontmoetingsplaats beschrijft *avant la lettre* de destructieve interferentie maar dan voor stootgolven. Huygens beperkt zijn betoog tot stootgolven en laat zich over de periodiciteit daarvan niet uit. Maar uit niets blijkt dat dit betoog niet van kracht zou zijn voor een strikt periodieke reeks stootgolven. We moeten vrezen dat Cohen denkt dat volgens Huygens elkaar kruisende niet-periodieke golven niet interfereren en elkaar ongemoeid laten, maar dat dit verandert zodra er periodiciteit in het spel komt. Vermoedelijk denkt hij dat de golven elkaar dan door destructieve interferentie geheel of gedeeltelijk vernietigen. Cohen zou niet de eerste zijn (en vermoedelijk ook niet de laatste) die dat waandenkbeeld koestert. Klassiek is het geval van Berzelius die dacht dat door destructieve interferentie de golfenergie (*vis viva*) wordt omgezet in warmte. Wel moet worden opgemerkt dat de wat ongelukkige terminologie „destructieve interferentie" (het laatste bedacht door Young) misleidend is: per saldo „storen" noch „vernietigen" de golven elkaar. Overigens heeft Cohen natuurlijk volkomen gelijk als hij aanvoert dat Huygens' niet-periodieke golven zich niet geleend zouden hebben voor

de behandeling van enige door Newton waargenomen en beschreven verschijnselen als onder andere kleur. Maar dan moet wel worden opgemerkt dat Huygens zich uitdrukkelijk distantieerde van het onderzoek van kleurverschijnselen.
Afrondend schrijft Cohen: „*Nor could Huygens without the principle of destructive interference invented by Young a little more than a hundred years later account for the simplest of all optical phenomena, rectilinear propagation*". Deze uitspraak is geheel conform de ook nu nog heersende historiografische consensus die voornamelijk door overlevering in stand wordt gehouden en die men zelden aan de hand van deugdelijke fysische en logische criteria getoetst ziet. Overigens zit bij Cohen's uitspraak het venijn vooral in de staart. Door namelijk in de onderhavige context de rechtlijnige voortplanting „*the simplest of all optical phenomena*" te noemen debiteert hij onbedoeld een gotspe. Want was het niet juist Huygens die als eerste tot het baanbrekende inzicht kwam dat rechtlijnige voortplanting helemaal niet vanzelfsprekend is maar van de golfvoortplanting moet worden afgeleid, met dat inzicht de sleutel tot de golfoptica leverde en daarmee zijn tijd meer dan honderd jaar vooruit was? En duurde het niet tot ver in de negentiende eeuw voordat ook de laatste tegenstanders van het primaat van de golven bij de lichtvoortplanting zich gewonnen gaven? [ref. 7, i.h.b. p.5].
Uiteraard, zoals eerder vermeld, kon Huygens' oerversie, ondanks een poging van Huygens zelf, nog niet voorzien in rechtlijnige voortplanting. Maar de hardnekkige consensus dat dit absoluut niet mogelijk was geweest zonder incorporatie van het latere concept van destructief interfererende harmonische golven is een misvatting gebleken [9, 5].

Alan E. Shapiro

Deze Amerikaanse wetenschapshistoricus geldt als een specialist op het gebied van de 17e-eeuwse optica. In een lang artikel [12] behandelt hij uitvoerig de toenmalige ontwikkeling van de optica. Uiteraard komt daarbij ook het principe van Huygens aan de orde. Naast de gebruikelijke historiografische uitweidingen over dit onderwerp waagt de auteur zich opmerkelijk genoeg aan een door hemzelf opgesteld natuurkundig betoog waarmee hij wil laten zien waarom met Huygens' oerversie de rechtlijnige voortplanting niet kan worden verklaard. Hoewel dat in 1869 al werd aangetoond door de fysicus Émile Verdet [13], meent Shapiro een bewijs te moeten leveren met middelen die in Huygens' tijd gebruikelijk waren; „*---this can be demonstrated without leaving the realm of seventeenth century physics.*" aldus Shapiro. Echter, hoe prijzenswaardig dit streven naar „authentieke" bewijsvoering ook moge lijken, het door hem verzonnen betoog, hoe ingenieus ook, heeft geen enkele waarde. Hij verzuimt namelijk, evenals trouwens Huygens zelf destijds, in aanmerking te nemen dat het hier gaat om een ruimtelijk probleem. Net als Huygens houdt hij zijn betoog aan de hand van een situatie in het platte vlak. Shapiro zou dus hetzelfde resultaat moeten vinden als Huygens, namelijk concentratie van de secundaire golven in het golffront en dus rechtlijnige voortplanting. Dat zijn conclusie tegengesteld uitvalt (geen concentratie dus) is te wijten aan een verkeerde sommeringsprocedure. Hij brengt namelijk naast de uit een golf ontspringende secundaire golven ten onrechte ook die uit andere stadia (vroegere en latere) van die golf in rekening wat tot een absurde verveelvoudiging van het werkelijke aantal secundaire golven leidt. Maar wat Shapiro zeker ook moet worden aangerekend is dat hij meent zonder voorzorgen te kunnen opereren met fysisch oneigenlijke begrippen, i.c. secundaire stootgolven met tijdsduur exact nul. Dat dit tot nonsens heeft geleid blijkt uit voetnoot 288 van zijn artikel. Wat hij daar concludeert komt erop neer dat hij met zijn betoog zou hebben aangetoond dat op het moment dat het golffront de positie CE bereikt (zie fig. 1), de intensiteit in een door hem gekozen, dichter bij de bron en dus niet op dat golffront gelegen punt L oneindig maal zo groot is als die ter plaatse van het golffront zelf omdat, aldus Shapiro, op dat moment in L oneindig veel golven arriveren en in elk punt van het golffront slechts één. Echter, de oorsprong van deze bizarre paradox moet niet, zoals Shapiro denkt, worden gezocht bij Huygens maar bij de verkeerde natuurkunde van Shapiro zelf. Die had er beter aan gedaan Verdet's bewijs te accepteren. Er is immers niets tegen om voor analyse van vroegere redeneringen gebruik te maken van later inzicht. Maar als Shapiro dan toch een „authentiek bewijs" wilde leveren, waarom dan niet geverifieerd of zijn twee-dimensionale uitgangssituatie wel dezelfde was als die van Verdet. En had hij met Verdet's situatie als voorbeeld zich niet moeten realiseren dat het rekenen met oneindig scherpe pulsen passende voorzorgen vereist? Trouwens, ook zonder kennis van Verdet's bewijs had Huygens' formulering [ref. 2, p.18 ref. 3, p.19 ref. 5, p.22] hem een waarschuwing moeten zijn. C (zie fig. 1) wordt daar niet raakpunt genoemd maar *1'endroit C* en secundaire golven worden geacht bij te dragen met *la partie de leur surface qui est la plus eloignée du centre A*, inplaats van met „het verst verwijderde punt". Shapiro's ongelukkige poging tot „authentiek" bewijs draagt niets bij en heeft alleen maar verwarring gebracht in een kwestie die al in 1869 door Verdet met een adequaat betoog tot klaarheid was gebracht. Dat de middelen waarmee Shapiro het juiste resultaat bereikt ondeugdelijk zijn (een verkeerde redenering toegepast op de verkeerde situatie) hoeft op zichzelf niet schadelijk te zijn voor Huygens'

reputatie. Kwalijk is echter wel dat Huygens zou moeten opdraaien voor alle nonsens van Shapiro's betoog. Overigens moet wel worden opgemerkt dat Verdet's bewijs oneindig scherpe pulsen impliceert. Maar uit Huygens' tekst valt weliswaar op te maken dat hij kortdurende pulsen bedoelt: „---*de chaque point lumineux il peut venir plusieurs milliers d'ondes dans le moindre temps imaginable,*---" [ref. 2, p.17], doch dat betekent natuurlijk niet dat hij uitging van een pulsduur exact nul. Dat Verdet dat wel doet is zeker een schoonheidsfout. In appendix 1 wordt naast Verdet's bewijs een eenvoudig alternatief voorgesteld waarbij aan de pulsen wel een bepaalde tijdsduur wordt toegekend.
Tenslotte Shapiro's merkwaardige visie op het concept van destructief interfererende harmonische golven als remedie voor het falen van Huygens' pulsmodel. T.a.v. Huygens' misvatting dat zijn secundaire pulsen zich zouden verdichten tot een golffront schrijft hij [ref. 12, p.225]: „*Fresnel showed that the secondary waves are imperceptible away from the wave fronts, not because they are too weak there, but because they destructively interfere there.*" En aan het slot van voetnoot 288 op p.227: „---*This difficulty, then, shows why another, far more radical way of limiting the intensities off the wave front, such as Fresnel's approach, was needed.*" Kennelijk heeft Shapiro zich niet gerealiseerd dat een zich vrij voortplantende sinusgolf een continuum vormt dat geen plaatsen kent waar de intensiteit zich concentreert, dit in tegenstelling tot het gedrag van een reeks zich voortplantende discrete stootgolven, zoals Huygens zich dat voorstelde. Gebrek aan kennis van zaken heeft Shapiro ook hier parten gespeeld en het behoeft geen nader betoog dat zijn denkbeeld als argument pro Fresnel geen enkele waarde heeft. Overigens, dit ongelukkige idee daargelaten, de vraag wat dan wel de eigenlijke reden is van het falen van Huygens' pulsmodel

blijft natuurlijk relevant. De historiografie wijst in alle toonaarden naar het ontbreken van periodiciteit als fundamentele oorzaak. We zagen dat al bij E.J. Dijksterhuis en bij I. Bernard Cohen. Aanvankelijk was Shapiro van mening dat voor Huygens zelf het ontbreken van periodiciteit geen dwingende voorwaarde was. Hij schrijft [ref. 12, p.222]: „*One should not make too much of Huygens' rejection of periodicity, ---*". Maar zes jaar later herroept hij dat [ref. 14, p.206 e.v.] omdat hij is gaan vermoeden dat Huygens zich genoodzaakt zag de periodieke opeenvolging van de pulsen te verwerpen, daarmee in de voetsporen tredend van I. Bernard Cohen die dat ook dacht zij het om een andere reden. Anders dan Cohen vermoedt Shapiro dat Huygens de periodiciteit verwierp om zijn verklaring van de rechtlijnige voortplanting niet in gevaar te brengen en hij probeert zijn vermoeden te staven met een betoog [ref. 12, p.207] waarin hij de vermeende ongewenste kenmerken van een situatie met periodiek opeenvolgende pulsen beschrijft. Maar dan verzuimt hij aan te geven waarom de niet-periodieke situatie die kenmerken niet zou vertonen. Wegens het ontbreken van een gemotiveerde conclusie blijft het dus bij een non-betoog van een soort dat Pauli eens deed uitroepen: „*Es ist nicht einmal falsch!*". Overigens, voortzetting van Shapiro's betoog leert dat het vermeende verschil niet bestaat, wat niet verwonderlijk is omdat zoals we al zagen, Huygens' formulering geldt voor elke puls afzonderlijk. En omdat volgens Huygens de pulsen elkaars voortplanting niet beïnvloeden, was er voor hem geen enkele aanleiding om te vrezen voor een invloed van periodiciteit op de geldigheid van zijn model. De gedachte dat Huygens de door hem verborgen gehouden bedoeling zou hebben gehad zijn voortplantingsmodel te vrijwaren van een voor het functioneren van dat model schadelijke periodiciteit is puur speculatief en houdt tevens de insinuatie in dat hij voor zijn lezers een ernstige beperking van zijn principe, i.e. ongeldigheid voor een periodieke reeks van pulsen, zou hebben verzwegen. We moeten Shapiro nageven dat hij het nog houdt bij de voorzichtige formulering: *„I think I have uncovered here Huygens' reason for rejecting periodicity ---"*. Cohen echter, zegt botweg: *„In fact, Huygens' denial of periodicity --- was an attempt to account for ---"*. In de historiografische discussie over het ontbreken van periodiciteit bij Huygens valt het op dat periodiciteit niet alleen gezien wordt als sleutelconcept voor de latere ontwikkelingen. Zoals we zagen wordt namelijk van verschillende zijden gesuggereerd dat periodiciteit ook voor Huygens verkieslijk zou zijn geweest en wel in de vorm van regelmaat in zijn pulsreeks maar dat hij dat „voordeel" noodgedwongen zou hebben prijsgegeven. Merkwaardig is hierbij dat de voor de hand liggende vraag wat dan die regelmaat had kunnen bijdragen aan Huygens' voortplantingsmodel nooit wordt gesteld. Het antwoord op die hamvraag is simpel: Niets. Er is geen enkele reden dat voor Huygens een periodieke pulsreeks te verkiezen zou zijn boven een niet-periodieke en, zoals we al zagen is het voor Huygens' voortplantingsmodel irrelevant of de pulsreeks periodiek is of niet. Desondanks blijft men voor Huygens de periodiciteit hardnekkig als issue beschouwen en merkwaardig genoeg beperkt men zich daarbij tot het algemene begrip „periodiciteit"; van de latere succesvolle vorm daarvan, de harmoniciteit wordt geen gewag gemaakt. We moeten dus constateren dat de „aanbevolen" regelmaat in de pulsreeks voor Huygens' oerversie niet meer dan een zinledig attribuut zou zijn geweest. Absurd wordt het als dan ook nog, *adding insult to injury*, wordt gesuggereerd dat Huygens zelf slechts noodgedwongen van die periodiciteit zou hebben afgezien. De hardnekkige pogingen Huygens postuum een periodiciteitsdilemma aan te praten hebben wellicht te maken met het idee dat gezien het succes van Newton met het periodiciteitsbegrip bij het kleurenvraagstuk en dat van Fresnel bij zijn voortplantingsmodel, ook het voortplantingsmodel van Huygens zonder periodiciteit onmogelijk levensvatbaar zou kunnen zijn en het motto lijkt hier wel te zijn: „Periodiciteit moet, ook voor Huygens, al weten we zo gauw niet waarvoor precies". Maar het is natuurlijk duidelijk dat het nut van Newton's periodiciteit voor het kleurenvraagstuk niets te maken heeft met de vraag of een regelmatige pulsreeks nuttig zou zijn geweest voor Huygens' voortplantingsmodel. Ook een vergelijking met Fresnel gaat mank: De aan Huygens opgedrongen regelmatige pulsreeks is weliswaar een periodieke maar geen harmonische golf.

Eindnoten

1) Mogelijk heeft Verdet door te kiezen voor oneindig scherpe pulsen, zijn bewijs in de passende historische context willen plaatsen, daarbij het ongemak van de singuliere pulsgedaante voor lief nemend. Maar als die historische authenticiteit werkelijk het motief voor zijn keuze is geweest, dan mag dat wel *insult added to injury* heten want was het niet juist Huygens die met zijn zorgvuldige formulering de fysisch oneigenlijke situatie met pulsen van een tijdsduur exact nul vermeed?
2) De tijdevolutie is een belangrijk aspect van deze ringzone en vormt een wezenlijk onderscheid van de per definitie stationaire Fresnel-zones.
3) Als T naar nul gaat, krimpen schijf en ringen, om voor $T=0$ samen te degenereren tot het punt P_1 wat de onhandelbaarheid van de situatie voor oneindig scherpe pulsen ook nog eens meetkundig illustreert.
4) Zoals eerder opgemerkt wijst de woordkeus voor de formulering van zijn principe [2, p.18; 3, p.19; 5, p.22] erop dat hem een fysisch realistische, weliswaar kleine, maar van exact nul verschillende tijdsduur voor ogen stond.
5) Het linkse gedeelte telde hij niet mee omdat hij, overigens ten onrechte naar later is gebleken, terugstralende secundairen uitgesloten achtte.
6) Dat is wel ironisch als we bedenken dat het volgens een in brede kring aangehangen consensus, juist de vervanging van de pulsgolf door een harmonische golf zou zijn geweest waardoor de verklaring van de rechtlijnige voortplanting mogelijk werd.
7) Hoewel de superpositie in de oorspronkelijke formulering van zijn principe uiteraard slechts positieve bijdragen kent (er zijn immers alleen „voorwaartse" stoten), geeft Huy-

gens elders in zijn tekst [2, p.16] een meer algemene voorstelling van zaken. Hij bespreekt daar hoe eenzelfde materiedeeltje kan dienen voor de voortplanting van verschillende golven, die komend uit verschillende of zelfs tegengestelde richtingen, daar gelijktijdig op inwerken. Ter adstructie beschouwt hij een situatie waar in een aaneengesloten rij gelijke elastische bollen gelijktijdig aan beide uiteinden een stootgolf wordt geïnjecteerd. De twee tegengesteld lopende golven ontmoeten elkaar bij de middelste bol en vervolgen ondanks dit „incident" beide ongehinderd hun weg. De middelste bol is bij die ontmoeting aan weerszijden samengedrukt en daarna weer elastisch teruggeveerd. Het is evident dat deze bol, die aldus gelijktijdig de voortzetting van beide golven heeft bewerkstelligd, daarbij niet van zijn plaats is geweest.

8) Dat is niet het geval bij Fresnel's voortplantingsmodel voor harmonische golven: de betreffende factor hangt daar af van de golflengte. In zijn kritiek op Fresnel's inzending voor de beroemde prijsvraag beschouwde Poisson dat als een ongerijmdheid [7, p.191], zonder evenwel aan te geven wat daarvan dan de schadelijke implicaties zouden zijn. Bij de bespreking van Fresnel's voortplantingsmodel zal dat aan het licht komen.

9) In appendix 1 zal blijken hoe deze conclusie op grond van later inzicht moet worden genuanceerd.

10) Ik gebruik hier de term „destructieve interferentie" omdat die gebruikelijk is, maar ik wijs erop dat het adjectief „destructief" ten onrechte suggereert dat interfererende golven elkaar wederzijds kunnen vernietigen. Dit komt later nog ter sprake.

11) Dat valt gemakkelijk te begrijpen als we bedenken dat alleen de secundaire golf uit P in Q zonder fase-achterstand

aankomt, terwijl voor alle andere punten van de eerste zone de secundairen een grotere fasevertraging ondervinden omdat voor die punten de weg naar Q langer is.

12) Als gevolg van ontbreken van vormbehoud is Fresnel's voortplantingsmodel inconsistent. Door verdeling namelijk van het voortplantingsproces in N stappen wordt het fasedefect $N\pi/2$. De resulterende fase is dus slechts gedefinieerd *modulo* $\pi/2$

13) Dat betekent in hedendaagse terminologie dat we zo op een simpele manier van het frequentiedomein in het tijddomein geraken. Dat is nodig omdat in het frequentiedomein de tijd slechts *modulo* T gedefinieerd is, wat een adequate redenering in de weg zou staan.

14) Als criterium voor rechtlijnige voortplanting wordt veelal de bij afnemende golflengte toenemende scherpte van de schaduwgrens van een scherm met rechte rand aangevoerd. Onbevredigend daarbij is dat de redenering niet wordt gehouden aan de hand van zich vrij van obstakels in de ruimte voortplantend licht, maar beperkt blijft tot een rakelings langs de schermrand scherende straal. Ook moet bedacht worden dat, de visie van Fresnel volgend, bij de totstandkoming van het schaduwbeeld het gehele zich tot het oneindige uitstrekkende onafgeschermde gebied van het golffront betrokken is.

15) Dat stelt de overtuiging van sommige vooraanstaande hedendaagse historici, dat periodiciteit een basiskenmerk zou zijn van „echte" golven en die opvatting als dogma uitdragen, merkwaardig in het licht.

16) Overigens maakte hij het zich daarbij, naar later bleek, onnodig moeilijk door te eisen dat terugstralende secundairen nooit zouden mogen voorkomen. Baker & Copson [21, p.30] hierover: „*Fresnel believed that, if all the sources*

*were inside S, the secondary sources on each separate element dS would produce a null effect at points within S. This is evidently not the case. The effect inside S produced by the action of **all** the secondary sources on S is however null,---"*

17) Het is niet duidelijk of Fresnel die ook daadwerkelijk heeft ingevoerd. Uit Baker & Copson blijkt dat niet expliciet en Buchwald [7, p.332] stelt dat Fresnel die $\pi/2$ fasevoorsprong nooit heeft ingevoerd.
18) In het reguliere scenario waar harmonische golven regel zijn wordt daarom die resulterende golf „diffractie" genoemd. Maar voor het geval van een kortdurende puls ligt het meer voor de hand de centrale puls als het zich niet door het scherm gestoorde vrij voortplantende aandeel te zien en de randgolf als diffractie.
19) Zoals geïllustreerd in figuur 2 zijn de bijdragen tot die „staart" in Q afkomstig uit de perifere gebieden van het golffront V rondom P_1. Het falen t.a.v. de rechtlijnige voortplanting moet dus worden gezien als een rechtstreeks gevolg van de vorming van die staart.
20) Zolang de bestaande kennis van het golfgedrag nog niet toereikend is om over de geldigheid uitsluitsel te geven zou deze nieuwe vorm van het postulaat niet minder legitiem zijn geweest dan de oorspronkelijke.
21) Ik wijs hier op een andere niet te negeren factor die tot ver in de negentiende eeuw de aanvaarding van de door Huygens geïnitieerde opvattingen van de lichtvoortplanting in de weg heeft gestaan, een factor, niet zozeer gebaseerd op gegronde wetenschappelijke twijfel maar veeleer op diep geworteld ongeloof. Velen konden zich er niet bij neerleggen dat in de fysica van het voortplantingsproces, het primaat zou komen te liggen bij de superpositie-eigenschappen van hypothetische, alleen in hun superpositie

waarneembare secundaire golven, waarbij dan juist de vertrouwde, zich zo duidelijk manifesterende lichtstralen niet langer gezien moesten worden als de dragers van de voortplantingsfunctie en aldus gedegradeerd zouden worden tot een van die superpositie-eigenschappen afgeleid secundair fenomeen. Citeren we hier de historicus Buchwald [7, p.5]: „*To accept Huygens' Principle requires abandoning the idea that a ray has much intrinsic physical significance, and very few people were willing to do so*".

22) „*ray traditionalists*" in de terminologie van Buchwald [7]
23) In de literatuur (i.h.b. de historiografie) wordt dit meestal anders geformuleerd: Men ziet daar Fresnel's harmonische golf niet als de vervanging van de enkelvoudige puls in Huygens' formulering maar—uiteraard ten onrechte dus—als die van Huygens' puls**reeks**.
24) Een aanwijzing voor het tegendeel vinden we in de in hoofdstuk 6 vermelde discussie tussen Fresnel en Poisson, die beide van mening waren dat er vanzelfsprekend ook rechtlijnige voortplanting moet zijn voor een enkelvoudige puls, hetgeen inhoudt dat zij voor een verklaring van de rechtlijnige voortplanting het interferentie-principe van Young niet onontbeerlijk achtten. Inderdaad hebben we in hoofdstuk 6 gezien dat men voor die verklaring met het meer algemene, reeds door Huygens aangegeven superpositiebeginsel kan volstaan.

Referenties

[1] Klaas Landsman, *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde* **69**, 40 (2003);
[2] Christiaan Huygens, *Traité de la Lumière,* Leiden, 1690;
[3] Christiaan Huygens, *Treatise on Light* (Engelse vertaling door Silvanus P. Thompson), Dover Publ. Inc., New York;
[4] Émile Verdet, *Leçons d'optique physique,* **1**, 38-41 (1869);
[5] H. de Lang, *Christiaan Huygens originator of wave optics,* p.19 Proceedings Huygens Principle 1690-1990, H. Blok, H.A. Ferwerda, H.K. Kuiken (editors) Elsevier;
[6] A.J. Fresnel, *Oeuvres,* **1**, 247-263;
[7] Jed Z. Buchwald, *The Rise of the Wave Theorie of Light,* The University of Chicago Press, Chicago and London 1989;
[8] G. Kirchhoff, *Berliner Sitzungsbericht* p.641 (1882);
[9] H. de Lang, *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde,* **A54** (1988) 47;
[10] E.J. Dijksterhuis, „*De mechanisering van het wereldbeeld*", Amsterdam 1950;
[11] Sir Isaac Newton, „*Opticks*", Dover Publications Inc., New York;
[12] Alan E. Shapiro, „*Kinematic Optics, a Study of the Wave Theory of Light in the Seventeenth Century*", Archives for history of exact sciences **11** (1973) 134-266;
[13] Émile Verdet, *Leçons d'optique physique* **1** (1869) 38-41;
[14] Alan E. Shapiro, Huygens Symposium, Amsterdam 1979, published H.J.M. Bos *et al* (eds.), „*Studies on Christiaan Huygens*", Swets & Zeitlinger B.V., Lisse 1980;
[15] C.D. Andriesse, „*Titan kan niet slapen*", Uitgeverij Contact Amsterdam;
[16] C.J.M. Hakfoort, „*Optica in de eeuw van Euler*", dissertatie, 1986, (Rodopi, Amsterdam);

[17] M. Born & E. Wolf, „*Principles of Optics*", Pergamon Press 1959;
[18] Thomas Young, Phil. Trans. Roy. Soc. 20 (1802, 26);
[19] A. Sommerfeld, Math. Ann., 47 (1896), 317;
[20] A.J. Kox & P.H. Polak, „*Van Stevin tot Lorentz*", Bert Bakker;
[21] B.B. Baker and E.T. Copson, „*The mathematical theory of Huygens' principle*", Oxford , Clarendon Press, 1939;
[22] Joseph Braat, Uittreerede TU Delft, p.2;
[23] Handbuch der Physik Bd 6 Barth Leipzig 1906.

Verantwoording

Opmerkingen:

- Het had voor de hand gelegen als pagina 16 met het bovenste deel van het betoog van pagina 10 tot één geheel zou zijn omgewerkt;
- De onderste helft van de tekst op pagina 28 vertoont veel overeenkomst met de tekst onderaan pagina 21;
- Het middendeel van pagina 62 staat ook in eindnoot 7.

Veranderingen ten aanzien van de oorspronkelijke tekst:

- Op pagina 7 stond in het manuscript zomaar een los rijtje namen: omdat de bedoeling van deze opsomming niet te duiden valt en omdat genoemde personen verderop in de tekst toch wel aan bod komen er voor gekozen dit maar weg te laten;
- De nummering van de figuren was niet in volgorde van opkomst en die is aangepast voor de duidelijkheid;
- In de formule voor het „oppervlakte-element dS van (1)” op pagina 53 ($2\pi p \sin(z/p)dz$) ontbrak de dz en die is toegevoegd;
- Eén figuur waaraan in de tekst nergens wordt gerefereerd en waarvan de betekenis niet te duiden valt is weggelaten.