

RealD 3D

– et nysgerrigt studium af den seneste 3D-filmteknologi

ULRICH B. HOFF, CPH West, Ishøj Gymnasium, Vejlebrovej 65, 2635 Ishøj, ulbh@cphwest.dk

Artiklen behandler den nyeste teknologi inden for 3D-film, kaldet RealD, med særligt fokus på at forstå RealD-brillens konstruktion og virkemåde. Desuden giver artiklen inspiration til, hvorledes fænomenet polarisation kan inddrages i gymnasiets fysikundervisning.

Indledning

En tur i biografen for at se det seneste skud på stammen af 3D-film – Avatar – inspirerede os, Claus Jensen, Ørestad Gymnasium og undertegnede, for nylig til en nærmere undersøgelse af RealD-teknikken og særligt de briller, figur 1, man som biografgænger bliver udstyret med, og som er helt afgørende for oplevelsen af den eftertragtede 3D-illusion. Vi blev herigennem erindret om de fascinerende og illustrative effekter, arbejdet med lysets polarisation rummer, og blev opmærksomme på et emne, der – så vidt os bekendt – kun sjældent behandles i gymnasiets fysikundervisning. Formålet med denne artikel er således todelte: (1) at videreformidle en nysgerrig undersøgelse af RealD-brillens polarisationsegenskaber og præsentere en model for dens konstruktion og virkemåde, samt (2) at give inspiration til, hvorledes emnet kan inddrages i fysikundervisningen – det være sig som en del af C-niveauets fænomnologiske behandling af lys og bølger, et forløb om aktuel teknologi såvel som et selvstændigt eksperimenterende og analyserende projektforløb på A-niveau.



Figur 1: Et eksemplar af den RealD-brille, der udleveres i biografene, og som undersøges i denne artikel. Kilde: news.cnet.com/i/bto/20090520/RealD.jpg.

Indledningsvist gives en kort præsentation af RealD-teknikken, da det er omdrejningspunktet for denne artikel, og derefter opridses den teoretiske beskrivelse af fænomenet polarisation, da det som nævnt ikke er en sædvanlig del af fysikfagets “pensum”. I den forbindelse beskrives to af de mest almindelige objekter, lineær polarisator og $\lambda/4$ -plade, til manipulation af lysets polarisation. Endelig giver vi en beskrivelse af, hvordan man med simple midler kan undersøge brillens polarisationsegenskaber, og hvilke observationer man i den forbindelse kan gøre sig. På baggrund heraf opstilles en model, der på tilfredsstillende vis forklarer brillens funktion og konstruktion.

RealD-teknikken

Vi vil i dette afsnit kort gøre rede for selve RealD-teknikken, for bedre at forstå, hvilke krav der stilles til brillen. Ligesom tidligere 3D-film teknikker benytter også RealD en stereoskopisk projektionsteknik til at opnå illusionen af en dybde i billedet. Med et særligt stereoskopisk kamera optages filmen simultant vha. to objektiver fra to forskellige synsvinkler, svarende til højre og venstre øjes lidt forskellige perspektiver. Ved fremvisningen projiceres billeder fra de to optagelser skiftevis op på lærredet, således at observatøren modtager to forskellige synsindtryk og derved oplever en dybde i billedet. Ved RealD alterneres der mellem de to perspektiver 144 gange i sekundet. Dybdeillusionen er betinget af, at observatøren kan adskille de to optagelser fra hinanden, således at højre/venstre øje kun ser billeder optaget med højre/venstre øjes perspektiv. Dette opnås ved at benytte ortogonale polarisationer ved projektionen af de to billedsæt og ved at lade observatøren bære en brille, der på passende måde filtrerer det lys, der reflekteres fra lærredet. Tidligere 3D-film-teknikker benyttede ortogonale lineære polarisationer, hvilket havde den ulempe, at observatørens synsoplevelse afhæng af hvorledes denne drejede sit hoved i forhold til lærredet. Dette problem har RealD imidlertid løst ved at anvende højre-og venstre-cirku-

lært polariseret lys til de tilsvarende perspektiver. Den hurtige alternation mellem de to polarisationsstilstande opnås ved brug af en såkaldt Z-screen komponent, baseret på elektro-optisk modulation af lysets polarisation [6]. En skematisk fremstilling af RealD-fremvisningsteknikken er gengivet i figur 2. For at vende tilbage til RealD-brillen skal den altså have følgende egenskaber: det højre glas skal transmittere højre-cirkulært polariseret lys og blokere venstre-cirkulært, mens det venstre glas skal transmittere venstre-cirkulært polariseret lys og blokere højrecirkulært. Vi vil i resten af artiklen undersøge et par af disse briller nærmere med henblik på at afklare, hvordan de netop beskrevne egenskaber opnås.

Polarisation

Det er velkendt, at Maxwells ligninger, se f.eks. [1], fører til et sæt af 2. ordens differentiaalligninger (1), der beskriver det elektriske og magnetiske felts udbredelse i vakuum

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}, \quad \nabla^2 \mathbf{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2,99792458 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (2)$$

og at de sædvanlige løsninger til disse ligninger er transversale plane bølger med vinkelfrekvens ω for hhv. det elektriske og magnetiske felt, som desuden er indbyrdes ortogonale.

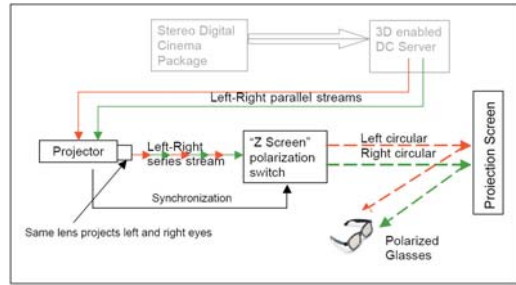
$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = E_0 \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t) \hat{\mathbf{n}} \quad (3)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = B_0 \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t) (\hat{\mathbf{k}} \times \hat{\mathbf{n}}) \quad (4)$$

hvor $\hat{\mathbf{n}}$ markerer, at vektoren er en enhedsvektor. Bølgevektoren \mathbf{k} angiver bølgens udbredelsesretning og polarisationsvektoren $\hat{\mathbf{n}}$ bølgens polarisationsretning. Det er per konvention orienteringen af det elektriske felts svingningsplan, der fastlægger den elektromagnetiske bølges polarisationsretning. I det følgende vil vi begrænse os til kun at betragte det elektriske felt, men vil dog stadig bruge betegnelsen elektromagnetisk bølge.

Lad os betragte en elektromagnetisk bølge, der udbreder sig langs z -retningen og hvis komponenter, pga. transversalitetsegenskaben, derfor udelukkende er langs x - og y -retningerne, givet ved

$$\mathbf{E}(z, t) = \mathbf{E}_x(z, t) + \mathbf{E}_y(z, t) \quad (5)$$



Figur 2: Principskitse af RealD-teknikkens virkemåde. Kilde: [www.edcf.net/edcf docs/real-d.pdf](http://www.edcf.net/edcf/docs/real-d.pdf).

Bølgens transverse komponenter er givet ved

$$\mathbf{E}_x(z, t) = \hat{\mathbf{e}}_x E_{0x} \cos(kz - \omega t)$$

$$\mathbf{E}_y(z, t) = \hat{\mathbf{e}}_y E_{0y} \cos(kz - \omega t + \varepsilon)$$

hvor ε er en relativ faseforskel imellem de to svingninger. I det tilfælde, hvor de to komponenter svinger i fase, dvs. $\varepsilon = n \cdot 2\pi$, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ bliver det resulterende felt

$$\mathbf{E}(z, t) = (\hat{\mathbf{e}}_x E_{0x} + \hat{\mathbf{e}}_y E_{0y}) \cos(kz - \omega t) \quad (6)$$

Til sammenligning med (4) er polarisationsvektoren i dette tilfælde givet ved

$$\hat{\mathbf{n}} = \frac{\hat{\mathbf{e}}_x E_{0x} + \hat{\mathbf{e}}_y E_{0y}}{\sqrt{E_{0x}^2 + E_{0y}^2}} \quad (7)$$

hvilket viser at det resulterende felt er lineært polariseret. Orienteringen af den resulterende lineære polarisation er karakteriseret ved polarisationsvinklen $\theta = \arctan(E_{0y}/E_{0x})$, hvorved polarisationsvektoren kan udtrykkes på formen

$$\hat{\mathbf{n}} = \cos(\theta) \hat{\mathbf{e}}_x + \sin(\theta) \hat{\mathbf{e}}_y \quad (8)$$

Vi betragter nu det tilfælde, hvor det elektriske felts x - og y -komponenter er forskudt med en relativ faseforskel $\varepsilon = \frac{1}{2}\pi$. Desuden antager vi, at amplituden af de to komponenters svingninger er ens $E_{0x} = E_{0y} = E_0$. Det resulterende felt bliver nu

$$\mathbf{E}(z, t) = E_0 [\hat{\mathbf{e}}_x \cos(kz - \omega t) + \hat{\mathbf{e}}_y \sin(kz - \omega t)] \quad (9)$$

I dette tilfælde roterer feltvektoren i positiv omløbsretning omkring z -retningen med konstant amplitude, og det elektriske felt betegnes som *cirkulært polariseret*. Hvis vi i stedet sætter den relative fase til $\varepsilon = -\frac{1}{2}\pi$ bliver det resulterende elektriske felt

$$E(z,t) = E_0 [\hat{e}_x \cos(kz - \omega t) - \hat{e}_y \sin(kz - \omega t)] \quad (10)$$

Det elektriske felt er igen cirkulært polariseret, men denne gang roterer polarisationsvektoren i negativ omløbsretning omkring z -retningen. De to forskellige typer af cirkulær polarisation betegnes hhv. venstre håndscirkulært (LHC) og højre håndscirkulært (RHC) [7]. Konventionen er følgende: hvis en observatør, der ser den elektromagnetiske bølge kommer imod sig, ser feltvektoren rotere med uret betegnes det som højre håndscirkulært, og hvis feltvektoren roterer mod uret betegnes det som venstre håndscirkulært. I det generelle tilfælde, hvor den relative fase ε antager en arbitrær værdi og hvor amplituderne E_{0x} og E_{0y} ikke er ens, er feltet *elliptisk polariseret* [2].

Manipulation af lysets polarisation

Der findes forskellige komponenter til manipulation af lysets polarisation. Vi vil her begrænse os til at beskrive to af de mest almindelige, som har vist sig relevante i forbindelse med undersøgelsen af RealD-brillen.

Den lineære polarisator

Det simplest tænkelige polarisationselement er den lineære polarisator, hvis funktion ganske enkelt er at polarisere det indkommende lys – det være sig polariseret eller upolariseret – langs en fastlagt retning. Dette sker ved, at netop den komponent af lyset, der er parallel med den valgte retning, transmitteres af polarisatoren, mens alt andet absorberes. Generelt vil intensiteten af lys altså svækkes ved passage af en lineær polarisator. Et velkendt eksempel på anvendelsen af sådanne polarisatorer er i polaroid solbriller. Virkningen af en sådan brille er baseret på, at det sollys, vi modtager på jordoverfladen, er upolariseret pga. gentagne spredningsprocesser i atmosfæren. Ved passage af en lineær polarisator vil en meget stor del af lyset således blive absorberet, og kun en lille del rammer øjet. Virkningen af en polaroid solbrille kan let undersøges foran en LCD skærm (laptop, mobiltelefon, digitalur, osv.), da det lys, der udsendes fra skærmen er lineært polariseret. Ved at rotere brillen foran skærmen ses, at ved

visse vinkler sker der en total “udslukning” af lyset fra skærmen, se figur 6.

Matematisk kan vi beskrive polarisatorens virkning som en projektion af den elektriske feltvektor på følgende måde: lad os igen betragte en lineært polariseret elektromagnetisk bølge, der udbreder sig langs z -retningen, givet ved

$$E_i(z,t) = E_0 \cos(kz - \omega t) \hat{n} \quad (11)$$

hvor \hat{n} fastlægger feltets polarisation i xy -planet. Polarisatorens transmissionsretning er givet ved vektoren

$$\hat{a} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{pmatrix} \quad (12)$$

og det transmitterede felt bliver

$$E_t(z,t) = (E_i(z,t) \cdot \hat{a}) \hat{a} \quad (13)$$

$$= E_0 \cos(kz - \omega t) (\hat{n} \cdot \hat{a}) \hat{a} \quad (14)$$

Heraf følger, at amplituden af det transmitterede felt er proportional med cosinus til vinklen mellem \hat{n} og \hat{a} , og at $E_t(z,t) = 0$, når $\hat{n} \perp \hat{a}$.

Kvartbølgepladen $\lambda/4$

Kvartbølgepladen, eller $\lambda/4$ -pladen, er mere kompliceret end den lineære polarisator. Dens funktion er at omdanne indkommende lineært polariseret lys til cirkulært – i det mest generelle tilfælde elliptisk – polariseret lys og vice versa. Dette opnås ved at udnytte særlige materials dobbeltbrydende egenskab, se f.eks. [2], hvor et anisotrop brydningsindeks giver anledning til at ortogonale polarisationskomponenter udbreder sig med forskellige hastigheder i materialet. Det dobbeltbrydende materiale er karakteriseret ved en symmetriakse for dets brydningsindeks, kaldet *den optiske akse*. Indkommende lys kan da splittes op i komponenter ortogonal og parallel med den optiske akse, kaldet hhv. den ordinære og ekstraordinære bølge, som hver især oplever brydningsindices n_o og n_e ved passage af materialet. Da $n_o > n_e$ følger af relationen $n = \frac{c}{v}$, at $v_{\parallel} > v_{\perp}$. Dvs. at den polarisationskomponent, der er parallel med den optiske akse, bevæger sig hurtigere igennem materialet end den ortogonale komponent. Resultatet af denne forskel i udbredelsehastighederne er, at der gennem passagen af materialet opbygges en faseforskel $\Delta\phi$

mellem de to polarisationskomponenter. Hvis det dobbeltbrydende materiale har en tykkelse d er den resulterende faseforskel givet ved

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda_0} d \cdot (n_o - n_e) \quad (15)$$

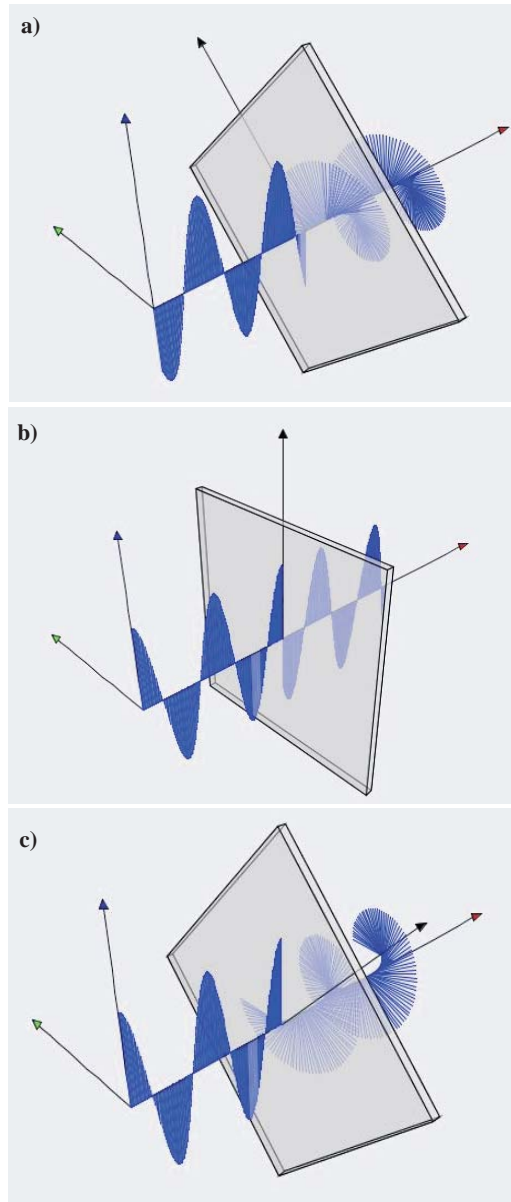
hvor λ_0 er det indkommende lys' vakuumbølgelængde. Den ovenfor beskrevne effekt af kvartbølgepladen, lineært \leftrightarrow cirkulært, opnås, når det dobbeltbrydende materiales beskaffenhed er således, at indkommende ortogonale polarisationskomponenter opnår et relativt faseskifte på $\Delta\phi = \frac{1}{2}\pi$, svarende til en kvart bølgelængde. Kvartbølgepladens effekt afhænger af, hvordan det indkommende lys' polarisation opløses langs bølgepladens ordinære og ekstraordinære akse og dermed af den relative orientering mellem bølgepladens optiske akse og retningen af den indkommende polarisation. Figur 3 viser tre eksempler på dette. Pga. kvartbølgepladens symmetri er illustrationerne i figur 3 også gyldige, hvis orienteringen af bølgevektoren (rød) vendes om, således at det i a) og c) er cirkulært polariseret lys, der rammer bølgepladen. I dette tilfælde vil indkommende cirkulært polariseret lys altså blive lineært polariseret ved passage af kvartbølgepladen. Kvartbølgepladen har desuden den egenskab, at det er underordnet, fra hvilken side lyset rammer pladen. Det er kun den relative orientering mellem den optiske akse og lysets polarisationsvektor, der er relevant.

Undersøgelse af RealD-brillen

Som nævnt er LCD skærme en let tilgængelig kilde til lineært polariseret lys, og vi vil nu beskrive, hvordan dette kan udnyttes til at analysere brillens polarisationsegenskaber og konstruktion.

Den første observation man kan gøre er, se figur 4, at der sker en svag dæmping af lyset, når brillen holdes med ydersiden af glasset mod skærmen, som hvis man sad med brillerne på og kiggede på skærmen.

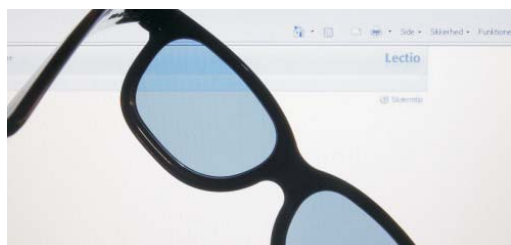
Mere interessant bliver det, når brillen drejes i forhold til skærmen, som vist på figur 5. Vi ser, at det transmitterede lys fremstår rødt eller blåligt, afhængig af, hvordan brillen roteres i forhold til skærmen. Vi vender tilbage til denne effekt senere, men lad os først vende brillen om, således at indersiden af glasset vender ind mod



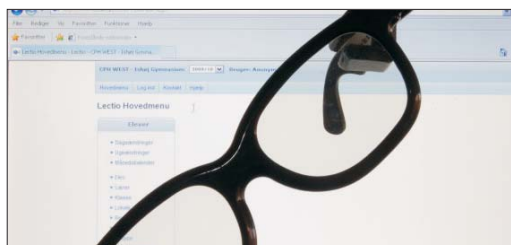
Figur 3: Faseændring af lineært polariseret bølge ved passage af en kvartbølgeplade. Blå akse: den indkommende bølges polarisationsretning; Rød akse: bølgens udbredelsesretning; Sort akse: kvartbølgepladens optiske akse. a), b) og c) viser effekten af kvartbølgepladen når vinklen mellem den indkommende polarisation og bølgepladens optiske akse er hhv. $\frac{1}{4}\pi$, 0 og $-\frac{1}{4}\pi$. I tilfælde a) og c) omdannes en lineær polarisation til hhv. LHC og RHC, mens polarisationen ikke ændres i tilfælde b). Kilde: Quarter-wave plate applet fra www.opensourcephysics.org.



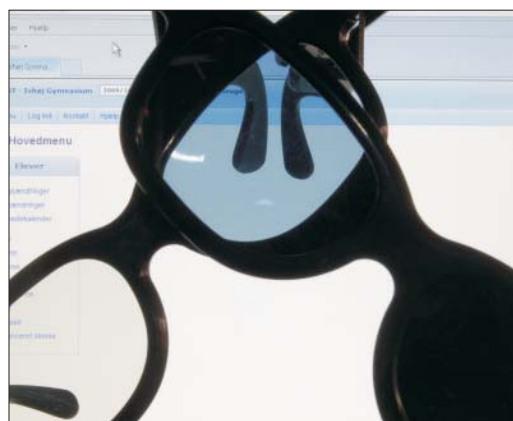
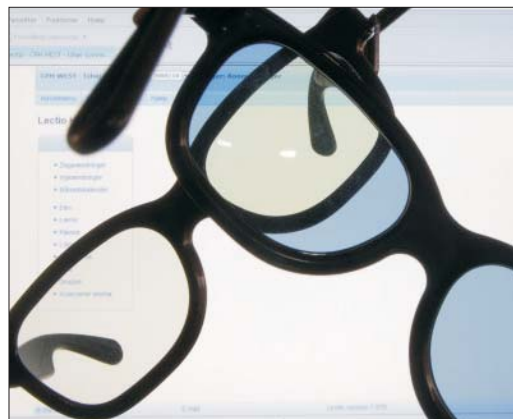
Figur 4: Når RealD-brillen holdes vandret foran skærmens lineært polariserede lys observeres en dæmpning af det transmitterede lys.



Figur 5: Transmission af lineært polariseret lys ved to tilnærmelsesvist vinkelrette orienteringer af brillen, når ydersiden af brillens glas er vendt mod lyskilden.



Figur 6: Transmission af lineært polariseret lys ved to vinkelrette orienteringer af brillen, når indersiden af brillens glas er vendt mod lyskilden.



Figur 7: Øverst: Yderside mod yderside, højre glas foran venstre glas. Midt: Yderside mod yderside, venstre glas foran venstre glas. Nederst: Inderside mod yderside, højre glas foran venstre glas.

skærmen og igen observere, hvordan det transmitterede lys afhænger af brillens orientering i forhold til skærmen. Som det fremgår af figur 6, transmitteres alt lyset gennem begge brilleglas i

det ene tilfælde – ingen dæmpning som på figur 4 – mens lyset blokkes fuldstændig, når brillen roteres 90° . Dette er netop hvad man ville forvente, hvis en lineær polarisator roteres i forhold til indkommende lineært polariseret lys, jf. diskussionen ovenfor. Vores første konklusion er altså, at brillerglassene blandt andet består af en lineær polarisator. At dette ikke kan være den fulde historie følger af, at tænd/sluk effekten kun observeres når indersiden af brillerglasset vendes mod LCD skærmen.

Med to par RealD-briller til rådighed kan vi fortsætte vores undersøgelse med at rotere brillerne i forhold til hinanden foran skærmens lineært polariserede lys. Vi undersøger først, om der er forskel på glassene i brillens højre og venstre side. Dette gøres ved at holde den ene brille foran skærmen, således at alt lyset transmitteres, og derefter skiftevis holde den anden brillens højre og venstre glas foran, se figur 7 øverst og midt. Brillerne er orienteret vinkelret i forhold til hinanden og holdes således at de to glas' ydersider er mod hinanden. I det første tilfælde ser vi, at det lys der transmitteres af den første brillens venstre glas blokkes af den anden brillens højre glas, mens lyset i det andet tilfælde transmitteres gennem både den første brillens venstre glas og den anden brillens venstre glas. Vi må altså konkludere, at brillernes højre og venstre glas ikke er identiske. Vi prøver nu at vende den forreste brille om, således at indersiden af dens glas vender mod den inderste brillens yderside, figur 7 nederst. Fra den foregående test, figur 6, ved vi, at den forreste brille nu skal blokkere alt lys fra skærmen. Dette er også tilfældet, men vi ser desuden, at lys der er transmitteret af den inderste brille nu også transmitteres af den yderste. Dette må betyde, at der er sket en rotation af lysets polarisation på 90° i forhold til det, der udsendes direkte fra skærmen. Lyset er nu polariseret langs transmissionsaksen for den forreste brillens lineære polarisator.

På baggrund af de beskrevne observationer kan vi nu formulere en hypotese for, hvordan brillernes glas er konstrueret: *Hvert glas består af to komponenter – en kvartbølgeplade på ydersiden og en lineær polarisator på indersiden. Kvartbølgepladernes optiske akser er roteret med 90° i forhold til hinanden, og de dan-*

ner hver især en vinkel på 45° med transmissionsaksen for den efterfølgende lineære polarisator. Transmissionsakserne for de lineære polarisatorer er parallelle. For at få lagt alle vinklerne fast i forhold til brillen, mangler vi altså at bestemme orienteringen af polarisatorernes transmissionsakse. Dette lader sig ikke gøre ved blot at rotere brillen foran LCD skærmen. Vi ved kun at skærmens lys er lineært polariseret, men ikke hvordan det er orienteret (vandret, lodret, $\pm 45^\circ$, ...)

Til at løse dette problem benytter vi, at lys polariseres ved refleksion fra overfladen af et dielektrisk materiale, f.eks. vand. Dette anvendes bl.a. ved fotografering, hvor uønskede refleksioner kan fjernes ved at montere et drejeligt polarisationsfilter foran linsen. Mere specifikt vil vi benytte os af Brewsters lov [2]: *Ved refleksion af upolariseret lys fra en dielektrisk overflade eksisterer der en bestemt indfaldsvinkel θ_p , hvorved kun den del af det indkommende lys, som er polariseret parallelt med refleksionsoverfladen vil blive reflekteret. Denne vinkel, kaldet Brewsters vinkel, er givet ved*

$$\tan(\theta) = \frac{n_t}{n_i} \quad (16)$$

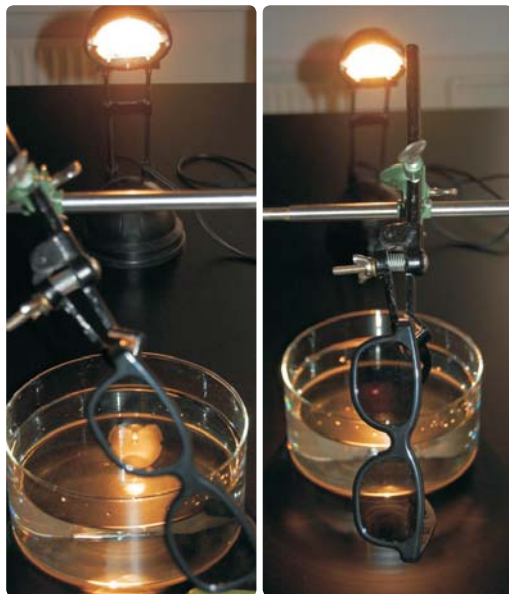
hvor n_t og n_i er brydningsindekset for hhv. det transmitterende dielektriske materiale og det materiale det indkommende lys udbreder sig i. Den fysiske årsag til denne effekt er den egenskab ved dipolstråling, at strålingsintensiteten er nul langs med dipolens oscillationsretning.

Som kilde til upolariseret lys benyttes en almindelig skrivebordslampe, og det reflekterende dielektriske materiale udgøres af en skål med vand. Opstillingen ses på figur 8.

På figur 9 ses, hvordan refleksionen fra vandoverfladen kan "tændes" eller "slukkes" ved at



Figur 8: Opstilling til bestemmelse af den lineære polarisators transmissionsretning ved hjælp af Brewsters lov.

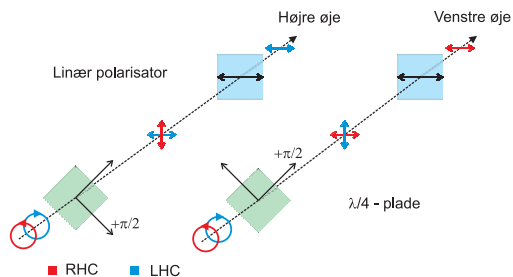


Figur 9: Ved at dreje brillen, så den lineære polarisators transmissionsakse er vinkelret på polarisationsvektoren for det reflekterede lys, kan refleksionen "slukkes".

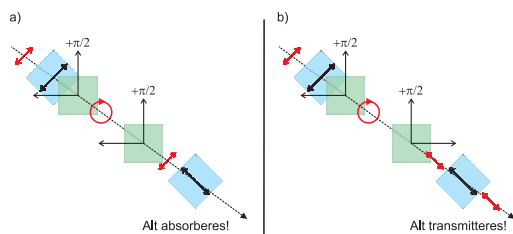
rottere brillen. Da vi fra Brewsters lov ved, at det reflekterede lys er lineært polariseret og parallelt med vandets overflade, kan vi på baggrund af figur 9 konkludere, at transmissionsaksen for den lineære polarisator på brilleglassets inderside er parallel med glassets bredderetning.

Vi kan nu sammenfatte vores model for RealD-brillens konstruktion, som vist i figur 10.

Lad os tjekke, om vi med denne model kan forklare de observationer vi gjorde tidligere i forbindelse med figur 7. Vi betragter figurens øverste og midterste billede. Modellens forudsigelser er gengivet grafisk i figur 11. Forskellen er altså, at i tilfælde a) modvirker de to faseskifte fra brillernes kvartbølgeplader hinanden således, at der samlet set ikke sker nogen ændring af lysets polarisationsvektor, hvorimod de i tilfælde b) adderer til $\Delta\varphi = \pi$ svarende til en rotation af den indkommende polarisationsvektor på 90° . Dette medvirker, at der i tilfælde a) sker en *total absorption* af lyset ved den sidste brillens lineære polarisator, mens der i tilfælde b) sker en *total transmission*. Modellen kan altså på acceptabel vis forklare de observerede effekter, samt hvorledes den ønskede polarisationsfiltrering opnås.



Figur 10: Skitse af brillens konstruktion og hvorledes lysets polarisation ændres under passagen af brillens højre og venstre glas. Lysets polarisation er angivet med røde og blå pile. De grønne kvadrater er kvartbølgeplader og de blå kvadrater lineære polarisatorer. Kvartbølgepladernes optiske akse er markeret med " $+\frac{1}{2}\pi$ " da den komponent af det indkommende elektriske felt, som er parallelt med denne akse, får et faseskifte på $+\frac{1}{2}\pi$ i forhold til den ortogonale komponent. Transmissionsakserne for polarisatorerne er angivet med sorte vandrette pile. Det ses, hvordan kombinationen af kvartbølgeplader og lineære polarisatorer med de angivne indbyrdes orienteringer, muliggør den ønskede filtrering af det indkommende cirkulært polariserede lys.



Figur 11: Forklaring af observationerne fra figur 7 ud fra den opstillede model. a) og b) svarer til hhv. figur 7 øverst og midt.

Tilsvarende konklusioner drages i H. Schmitzers behandling af RealD-brillens polarisationsegenskaber [3].

Vi har endnu ikke gjort rede for de observerede forskelle i farven af det transmitterede lys, når en enkelt brille roteres foran LCD skærmens lineært polariserede lys, figur 5. Denne effekt skyldes, at brydningsindekset generelt er en funktion af bølgelængden – dispersion, se figur 12. Dvs. at kvartbølgepladen strengt taget kun er en ægte kvartbølgeplade for lys med én bestemt bølgelængde. De forskellige bølgelængdekomponen-

ter, som tilsammen udgør det hvide lys fra LCD skærmen, oplever altså forskellige faseskift ved passage af kvartbølgepladen, og vil derfor opnå forskellige elliptiske polariseringer. Dette betyder, at bølglængdekomponenter i hver sin ende af det synlige spektrum i større eller mindre grad vil blive absorberet af den efterfølgende lineære polarisator, hvorved det transmitterede lys vil fremstå rødtligt eller blåligt, afhængig af, hvordan brillen roteres.

I den mere avancerede optik lader det sig gøre at konstruere kvartbølgeplader, der yder det ønskede faseskifte over et bølglængdeinterval på adskillige 100 nm, ved at kombinere forskellige dobbeltbrydende materialer. Men prisen er også derefter. F.eks. koster en såkaldt akromatisk kvartbølgeplade fra Thorlabs \$780 [8], hvilket selvsagt ikke er foreneligt med et produkt, hvis produktionsomkostning skal kunne indeholdes i prisen på en biografbillet.

Afslutning

Vi har i denne artikel behandlet den nyeste teknologi inden for 3D-film, kaldet RealD, med særligt fokus på at forstå RealD-brillens konstruktion og virkemåde. Lysets polarisation spiller en central rolle for denne teknologi, og vi har derfor indledningsvist forsøgt at opridsede den teoretiske ramme, hvormed polarisationen som fænomen beskrives. Teorien er efterfølgende blevet anvendt til at forklare nogle af de optiske komponenter, der typisk anvendes til manipulation af lyset polarisationsegenskaber, og som er essentielle for at forstå RealD-brillens funktion. Med en laptop-skærm som kilde til lineært polariseret lys, har vi foretaget en række observationer af brilleglassenes transmissionsegenskaber, og på baggrund heraf opstillet en model for deres konstruktion. Vores konklusion er, at hvert brilleglas er sammensat af en kvartbølgeplade (yderst) og en lineær polarisator (inderst), hvis optiske akse og transmissionsakse er orienteret med en vinkel på $\pm 45^\circ$ i forhold til hinanden. Polarisateurens transmissionsakse er i begge glas parallel med brillens bredderetning, mens kvartbølgepladernes optiske akser danner en vinkel på 90° . Denne konfiguration tillader brillen at filtrere højre- og venstre-cirkulært polariseret lys, således et kun



Figur 12: Et af de mest velkendte eksempler på brydningsindeksets afhængighed af bølglængde. Kilde: www.physics.uiowa.edu/~umallik/adventure/physoptics/prism.jpg.

højre-cirkulært lys når observatørens højre øje og tilsvarende kun venstre-cirkulært lys når det venstre øje. Det er denne filtrering af det lys, der reflekteres fra biografens lærred, som tilsammen med en stereoskopisk projektionsteknik giver observatøren den ønskede 3D illusion.

Ud over at have formidlet en eksperimentel undersøgelse og forklaring af RealD-brillens sammensætning, håber vi også at artiklen har givet inspiration til, hvorledes fænomenet polarisation kan inddrages i gymnasiets fysikundervisning. RealD er blot et enkelt eksempel på de talrige teknologiske anvendelser af denne egenskab ved lys, der desuden er af afgørende betydning for størstedelen af den eksperimentelle forskning inden for kvanteoptik og kold-atomfysik.

[1] D.J. Griffiths, *Introduction to Electrodynamics*, Prentice Hall, 1999.

[2] E. Hecht, *Optics*, Addison Wesley, 2002.

[3] H. Schmitzer, D. Tierney, and T. Toepker, *Phys. Teach.* **47**, 456, 2009.

[4] V. Jacques, E. Wu, F. Grosshans, F. Treussart, P. Grangier, A. Aspect, and J. Roch, *Science* **315**, 966, 2007.

[5] J.A. Wheeler and W.H. Zurek, *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, 1984.

[6] Elektro-optisk modulation af polarisation anvendes rutinemæssigt inden for eksperimentel kvanteoptik, og spillede blandt andet en central rolle i en nylig eksperimentel realisering [4] af J. A. Wheelers *Delayed-Choice tankeeksperiment*, [5], s.182-213.

[7] RHC = "right hand circular" og LHC = "left hand circular" er sædvanlige betegnelser i litteraturen.

[8] www.thorlabs.com/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=854. ◊