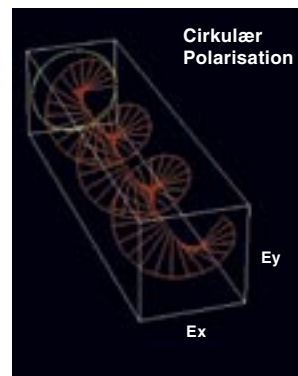


Lysets polarisation

Øjet og lyset 9

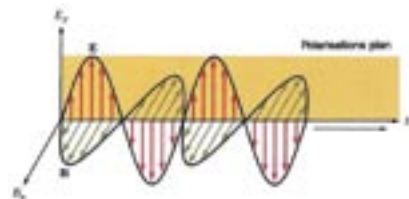


Af Per Nellesmann



Lyset har mange egenskaber, rumlige, spektrale, temporale, kohærens, men polarisation af strålingsenergien spiller også ind. Polarisationen hænger sammen med lysbølgernes transverselle udbredning. Hvis der er asymmetri langs den transverselle udbredning, vil det være en måde at polarisere lyset på.

Vi kan ikke beskrive lysets udbredning i en traditionel skalar, det vil sige trinvis, teori, som også omfatter polarisationen, men må anvende vektor teori for at beskrive periodiske fluktuationer i en mængde, som har såvel retning som størrelse.



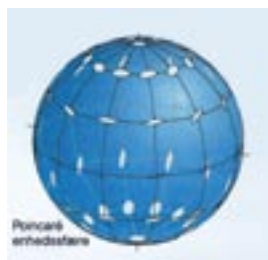
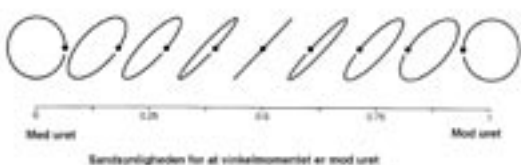
Ved planpolarisation er det elektriske E_y felt og det magnetiske B_z felt lokaliseret enkelt i ét plan vinkelret på hinanden.

Hvis den elektriske felt vektor er lokaliseret i kun ét plan, vibrationsplanet, er lyset plan polariseret, men det elektriske felt behøver ikke at være begrænset til ét plan, Felt vektoren kan også rotere med tiden. Amplituden og den relative fase på de samvirkende bølger bestemmer da Polarisationstilstanden. Polarisationen beskriver altså det stadie i sammenhængen mellem det elektriske og magnetiske felt som strålingen befinder sig på.

Rodiek(1998) forklarer polarisationen ned på foton niveau. Når elektronen udsender en foton, optager fotonen en variabel energimængde, afhængig af dens frekvens og en bestemt mængde af vinkelmomentet (angular momentum), som kan være højre drejet, med uret eller venstredrejet mod uret. Fotoner i hver af disse tilstande siges at være cirkulært / elliptisk polariseret

Det der er afgørende for om fotonen bliver højre eller venstredrejet er om fotonen bliver påvirket af stof før sin endelige absorption af en elektron.

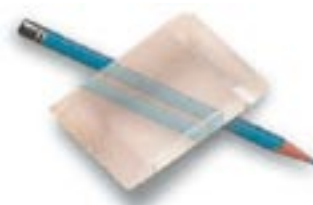
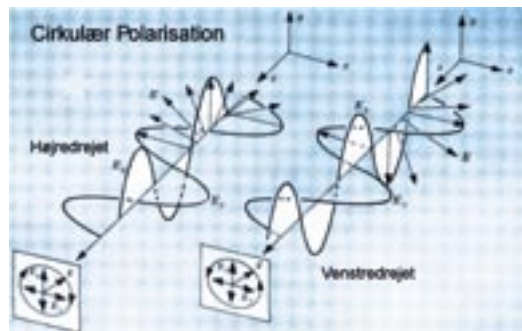
Hvis fotonen ikke vekselvirker med stof (interact with matter), før den senere bliver absorberet af en elektron, så vil elektronen både få energien og den mængde vinkelmoment, højre eller venstredrejet, som blev overgivet fotonen på det tidspunkt den blev udsendt. Men hvis fotonen derimod vekselvirker med stof før dens absorption, så er polarisationstilstanden usikker på en fundamental måde. Elektronen, som absorberer fotonen vil stadig få en bestemt mængde af vinkelmoment, men om det bli-



ver højre eller venstre drejet vil være et spørgsmål om sandsynlighed. Overgangstilstandene er vist i graduerede ellipser på figuren.

Alle disse sandsynligheder repræsenteres bekvemt på en enheds kugle, en Poincaré sfære. Polarisationstilstanden (P) på enhver foton afbildes på et eller andet punkt på kuglen og omvendt repræsenterer ethvert punkt på kuglen enhver polarisationstilstand, \mathcal{R}, \mathcal{L} , højre eller venstredrejet. Højredrejet er som en proptrækker eller et sneglehus.

Siden Rasmus Bartholin i 1690 gjorde opmærksom på, at den islandske kalkspat (Kalcit, Calcium Carbonat) er dobbeltbrydende har man undret sig over, hvordan det kunne gå til. Såvel den hollandske fysiker Huygens

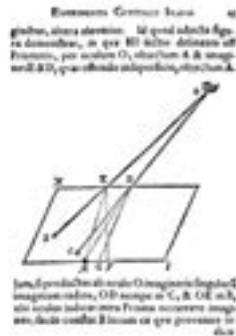


Dobbeltbrydningen (eng birefringence) i den islandske kalkspat, har historisk set været indgangsporten til forståelsen af det mystiske polarisation af lyset.



Rasmus Bartholin (1625-1698), astronom på observatoriet på Rundetårn og senere anatom, storebroderen Thomas's efterfølger.

ekstraordinære stråler vil gå direkte ned i vandet uden refleksion. Vinklen har også givet navn til Brewster vinduet (sv. fönster), (David Brewster 1781-1868), som er et skråtstillet glasvindue, der medvirker til opformeringen af laserlyset i for eksempel He-Ne laseren, idet den aktive gas er indesluttet mellem to Brewstervinduer.



Rasmus Bartholins tegning af dobbeltbrydningen i islandsk kalkspat.

som Newton forsøgte sig med en forklaring på hver deres måde, ved bølge-teori og korpuskulær teori, men uden held. Først med den franske militær ingeniør Etienne Malus fik man åbnet for forståelsen.

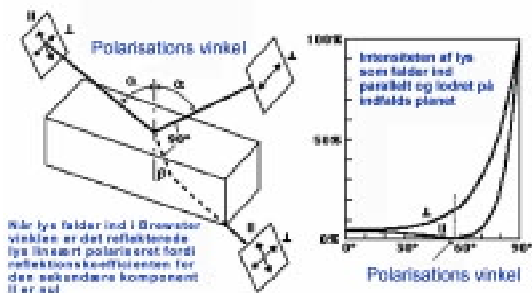
Fysikeren Ernst Mach, fortæller, at Malus var igang med en prisopgave om dobbeltbrydningen i kalcit, da han i det parisiske aftenlys ser gennem kalcitkrystallet og over på vinduerne i Luxembourg paladset, som lå overfor hans hjem. Han bliver forbløffet (sv. forbluffat), da han ser, at ved visse orienteringer af kalcitkrystallet er der kun et billede, og at det ordinære og det ekstraordinære forsvinder skiftevis ved rotation af krystallet. Imidlertid går solen ned, men Malus fortsætter i stearinlys og opdager, at de to billeddannende stråler opfører sig forskelligt. I en bestemt skrå vinkel (52° og 45°), Polarisationsvinklen, vil de ordinære lysstråler reflekteres af en vandoverflade på sædvanlig måde, men de



Fysikeren David Brewster 1781-1868

Dobbeltbrydningen giver anledning til *dikroisme*, dobbeltfarvning af visse krystaller og den består i sin bedste forstand af en selektiv absorption af en af de to ortogonale polarisations stadier.

Et rektangulært krystal, som NaCl, er isotropt det vil sige brydningen er ens i alle planer, der er samme brydningsindex. Hvis brydningen derimod er forskellig i flere planer, der er varierende brydningsindex, er det et udtryk for at de intermolekulære kræfter i krystallet er uens i forskellige planer. Krystallet vil da bryde lyset forskelligt



LCD skærmens tal er dikroiske og forsvinder når et skråstillet polarisationsfilter anbringes foran.



i flere planer og der vil opstå en dobbelt brydning. I LCD og FTF displayet påvirkes et dikroisk krystal med en spænding, så at det vil rotere optisk (blive twisted), og på denne måde give anledning til en ændret polarisation og en anden farve. På en regnemaskine, fra klar til blåsort.

På fladskærmen og på regnemaskinen er slukningsaksen i reglen 45 grader (HP) og 135 grader (FTF), så man undgår at lægge polaroidsolbrillen, fordi skærmen er sort, da solbrillen som oftest har vandret akse.

De *gule maculapigmenter*, lutein og zeoxanthin er dobbeltbrydende og nogle mennesker, men ikke os alle, har nemt ved at polariseret lys i form af en børste form, som beskrevet af den østrigske mineralog Wilhelm K. v. Haidinger (1795-1871).

von Frisch fandt ud af at *bierne* meddelte sig ved en runddans eller vrikke dans, når de skulle fortælle, hvor der var nektar. Dansen er ret præcis. "Der er nektar 2 km og 30 grader fra solen" kan dansen betyde.

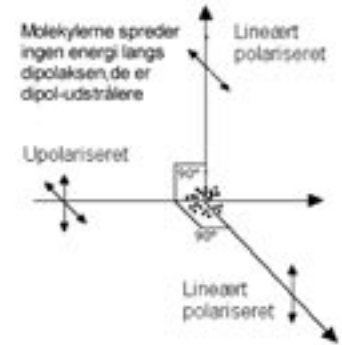
Sollyset er diffust upolariseret, men ved spredningen (scatter) i atmosfærens gas molekyler vil lyset polariseres vinkelret på molekylernes dipol. Med Polaroid solbriller kan vi se, at solen altid vil befinde sig 90 grader fra polarisationsmaksimum som er der, hvor himlen er mørkest gennem solbrillen.

Regnbuen vil vi også kunne se polariseret efter de interne refleksioner i vanddråberne. Når det er overskyet bliver sollyset igen diffust upolariseret, Sådan en overskyet dag ser vi heller ingen bier. De bliver hjemme.

Hvordan kan bier, myrer, fårekylinger (sv:sysja) og døgnfluer (sv.: dagslända) se polarisationen uden et dikroisk filter eller krystal? Alle dyr, vertebrater som non vertebrater har rhodopsin som synspigment i fotoreceptormembranen, og rhodopsin molekylerne vil absorbere polariseret lys maksimalt når det elektriske felt vibrerer i dipolaksen. I vertebrater er



Mineralogen Wilhelm K.V. Haidinger (1795-1871)



ne finde solen og bestemme solhøjden ved "breddesejlsads", selvom det var overskyet. Fra sagaerne kendte man solstenen, som nok var et dobbeltbrydende krystal, turmalin, cordierit eller et helt tredje, som kan findes i Skandinavien. Men sagafortællerens fantasi er sikkert løbet af med ham. Bierne er hjemme, når det er totalt overskyet og *vikingerne* har i den situation været nødt til at vente på stjernerne i stedet. Der skal være noget af himlen til syne for at himlens polarisering kan ses. Arkæologen Thorkil Ramskou fik ideen fra en SAS pilot. Ved DC-8 flyvning over Arktis, virkede magnetkompasset ikke og derfor havde man et "Sky Compass" i flyets næse. Man kunne bruge et polaroidfilter til at bestemme solhøjden for "ove nover skyerne er himlen altid blå". Metoden forsvandt med DC-8.

Polaroid solbrillen virker som en lineær polarisator. Edwin Land tog et stykke klart plastik, lange molekyllæder af polyvinylalkohol og imprægnerede det med jod. Molekylerne fik retning

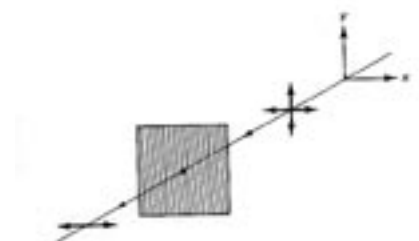


Illustration af wire risten. Når det upolariserede lys rammer et lodret absorberende lag (f.eks. Polaroid) bliver lyset planpolariseret.

Himmellyset er polariseret. De krydsede plane polarisationsfiltre har ikke samme lyshed. Det lodrette er mørkest på grund af himlens polarisation. Solen står da 90 grader herfra. Vi ser også at cellofanen giver andre farver når der er flere lag cellofan og altså anden lagtykkelse.



Tegning af Haidinger børste – de blå og gule områder kan ombyttes.

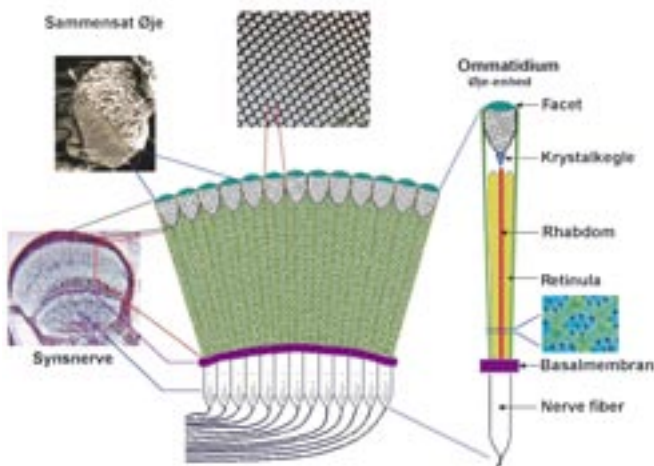
Men andre dyr, nogle insekter, nogle fisk og snegle og også octopus kan orientere sig ved hjælp af polariseret lys.

Vi skal helt frem til 1944 før Karl

rhodopsin molekylerne tilfældigt orienteret, men ikke i insektøjet. I det sammensatte multifacetterede insektoje er de mange 'simple øjne' (ommatidia) samlet i stjernemønster og den lysfølsomme del af synscellerne er en kæde cylinderformede membraner, hvor rhodopsinet sidder. Disse såkaldte 'mikrovilli' peger alle mod stjernens center, idet de danner en lysleder, rhabdomet.

Følsomheden for polariseret lys opstår ved at rhodopsin molekylerne overvejende er rettet parallelt med mikrovilli-cylindrene.

Det har været på tale, at også vikingerne, anvendte polariseret lys i navigationen for at kun-



Oversigt over insektets synsorganer.

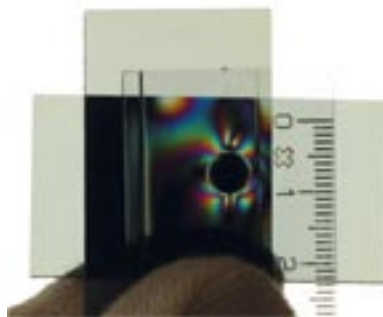
ved helt enkelt at strække plastikken. De ledende elektroner, som er forbundet med jodmolekylerne kører op og ned, som var de mikroskopiske wirer. Og de kommer derved til at give en lineær polarisation. Da solen normalt står over os, vil de skrå reflekser fra de vandrette overflader blive absorberet af polaroidsolbrillen, som normalt har en lodret akse. Det gælder især på søen og havet. Man kunne derfor tro at dykkende havfugle bruger polarisation til at få øje på fisken fra stor højde, men det er ikke lykkedes at påvise at fugle er følsomme for polarisation på denne måde, og i øvrigt heller ikke til orientering ved "fugletræk".



Cellofan mellem to krydsede pol-filtre.

lysets aktuelle fase. Hvis cellofanen bevirker en fasedifference der er anderledes end 180 grader, vil der trænge lys igennem. Farven vil da afhænge af tykkelsen på cellofanen som virker som en forsinker (retardation plate).

Mange almindelige dielektriske materialer, glas, plastik udviser dobbeltbrydning og somme tider kun under mekanisk stress, såkaldt *fotoelektrisk stress*.



Fotoelasticitet . Når et dielektrisk materiale f.eks cellofan og akryl anbringes mellem to krydsede polarisationsfiltre, forsinkes lysets fase og farver åbenbares af mørket.

Også det retinale nervetrådslag (RN-FL) udviser dobbeltbrydning på grund af axonernes cylindriske, dielektriske karakter og som vi har set i cellofanforsøget, er lagtykkelsen af betydning for billedannelsen. Måling af RNFL ved scanning laser polarimetri, har derfor betydning i diagnostikken af sygdomme i synsnerven, bl.a. glaucom. Den cirkulære polarisation giver anledning til Dracula effekten. Navnet skyldes at pøgelser (Spøke) og gengangere ikke giver refleks i spejle, som vi erindrere fra Transsylvanien. Ser vi gennem et



Draculaeffekten

Et cirkulært polarisationsfilter er fotograferet mod et spejl. Refleksionen (spejlbilledet) af polfiltret forsvinder fra forreste glasflade når en højredrejet polarisering efter rotation bliver venstredrejet og dermed udslukket og vice versa. Metalbelægningen på spejlets bagside depolariserer lyset, og giver derfor refleksion.

cirkulært polfilter i et spejl. bliver der sort svarende til refleksionen i glasset, fordi en højredrejet polarisering efter refleksion bliver venstredrejet og dermed udslukket. Refleksionen fra metalbelægningen dybere nede ses stadig, fordi metal depolariserer lyset. Metalglansen skyldes blandt andet, at depolariseringen medvirker til maksimal refleksion.

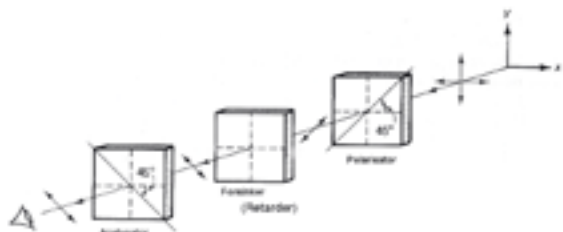


Illustration af polarisationstilstanden når en "retarder", et dielektrisk medie, anbringes mellem to krydsede polarisationsfiltre



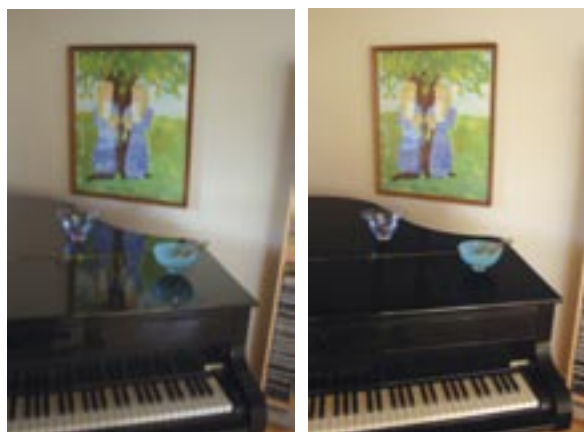
Cellofan mellem to krydsede pol-filtre.

Referencer: www.oftalmolog.dk

En ny Goethe gåde

Tager vi to stykker polaroid med samme transmissionsakse og lægger dem vinkelret over hinanden, som en analysator og polarisator, vil intet lys trænge igennem, der bliver sort over krydsningsstedet. Hvis vi nu lægger et stykke cellofan eller et andet *dielektrisk* materiale, imellem de to stykker polaroid, ser vi noget meget besynderligt. Der hvor der før ikke kom lys igennem, der var sort, kommer der nu et virvar af smukke farver. Man kunne næsten sige med Goethe: Lysets møde med mørket. Se billedet.

Af figuren kan vi se, at forklaringen er at cellofanen virker forsinkende på



Med pol filter kan generende reflekser fjernes, så farven bliver mættet.

Referencer:

- Albers, J : Interaction of Colors.Yale Univ Press. New Haven 1975
- Bang, B: Strejftog i Niels Bohrs tanker. Hernov København. 1999
- Boëtius, H., Lauridsen,M.L. og Lefevre,M.L.: Lyset, mørket og farverne. Goethes Farvelære, indblik og perspektivering. Multivers København .1998.
- Ditchburn, R.W. : Light. 3rd. Ed. Academic Press. London 1976.
- v.Frisch,K : The dance language and orientation of bees.Cambridge. Mass. Harvard Univ Press. 1967.
- v.Frisch,K : Om bierne . GECGad Forlag. København 1964
- Gelb, A.: Die Farbenkonstanz der Sehdinge. Handbuch der Normalen und Pathologischen Physiologie. 1929, 12, 594-678
- Goethe, Johann Wolfgang von : Goethe's Theory of Colours translated from german notes by Charles Lock Eastlake. London 1840. MIT ed. 1970
- Gregory; R L :Mind in Science. Penguin, 1981. London 1981.
- Gregory; R L :Eye and Brain.5th ed. Oxford Univ Press. Oxford.1996.
- Gregory; Richard : Mirrors In Mind. WH Freeman comp. N.Y. 1996.
- Grum, F. and Becherer, R.J. : Optical Radiation Measurements. Vol. 1. Radiometry. Academic Press . N.Y. 1979.
- Grum, F. and Becherer, R.J. : Optical Radiation Measurements. Vol. 2. ColorMeasurement. Academic Press . N.Y. 1980.
- Hubel, DH Eye, Brain and Vision. Sci.Am.Lib. N.Y.1987.
- Hunter DG et al. Mathematical modelling of retinal birefringence scanning. J Opt Soc Am A Image Sci Vis. 1999. 16: 2103-11.
- Mach, Ernst : The Principles of Physical Optics : an historical and philosophical treatment. Dover, 2003. Eng translat. reprint of the 1926 ed.
- McLaren, K.: The Colour Science of Dyes and Pigments. Sec. ed. Adam Hilger, Bristol,1986.
- Minnaert, M. : The nature of Color & Light in the open air. 1954 .Dover .N.Y
- McLaren, K. : The Colur Science of Dyes and Pigments. Adam Hilger Ltd. Bristol. Sec. Ed. 1986.
- Newton, Isaac : OPTICS or a Treatise of the Reflections,Refractions, Inflections & Colours of Light. Based on 4th.ed. London 1730. Dover Publ. N.Y.1079
- Palmer, S: Vision Science. Photons to Phenomenology. MIT Press.Cambridge, Mass.1999
- Penrose, R. :The Emperor's new Mind. Concerning Computers, Minds, and the laws of physics. Oxford Univ.Press. N. Y. 1989.
- Ramskou, Thorkild : Solstenen. Primitiv navigering i Norden før kompasset. Rhodos Forlag, København 1969.
- Rodieck, R W : The first steps of seeing.Sinauer.Sunderland,Mass. 1998.
- Tovée, M.J :An introduction to the visual system.Cambridge Univ. Press, Cambridge,1996.
- Uttal, W R : A taxonomy of the visual processes. Lawrence Erlbaum Ass. hillsdale, New Jersey. 1981.
- Weale, RA : Natural History of Optics. in The Eye.Comparative Physiology vol 6. eds Davson H< Graham.academic Press London 1974. 1-110.
- Wolken, JJ: Comparative Structure of invertebrate Photoreceptors. . in The Eye. Comparative Physiology vol 6. eds Davson H< Graham.academic Press London 1974. 97-226
- Wright, W D: The Rays are not coloured. Essays on science of vision and colour. Hilger. London. 1967.
- Wright, W D: The measurement of Colour.Hilger and Watts, London 1964
- Wysecki, G. and Stiles, W.S.: Color Science. Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae. John Wiley and sons, inc. New York. 1982. (sec. ed. 2000).
- Xiang-Run Huang et al. Variation of Peripapillary Retinal Nerve Fiber Layer Birefringence in normal Human Subjects. Invest Opthal. 2004 45: 3073-3080.
- Zajonc,A. : Cathing the Light. The entwined history of light and mind.1993. Oxford, Oxford
- Zeki, S: A Vision of the Brain. Blackwell. 1993.