



Af Per Nellemann

Synet under vand

Øjet og Lyset 21

Når vi svømmer under vand, mærker vi straks, når vi kommer under vandoverfladen, at det ser helt anderledes ud nede i vandet.

Synsskarpheden er meget dårligere, og genstande tæt på ses lidt forstørret, omkring 1/3. Farverne er mere blålige, hud og læber er blege og ikke let rødlige.

Vi kan ikke se over vandoverfladen, men er det vindstille og vandoverfladen helt blank, kan vi se et lille rundt hul, hvorigennem vi kan se opad. Her kan vi måske få øje på træer og skyer. Men uden for cirklen vil vandskorpen virke som et spejl, hvorfra lysstrålerne bliver reflekteret ved den såkaldte interne refleksion.

Det er en stor oplevelse at se fæ-



Ved dykning i havblik uden uro i vandet kan man se de interne refleksjer fra andre dykkere eller fisk. Kun gennem et lille cirkulært/ovalt område kan man se ud ad vandet. En fisker på land kan godt se fisken.



En ældre tegning af den interne refleksion under vand. Det er ikke let at orientere sig som fisk.



Illustration af illusionen 'det knækkede sugerør', 'bent stick', som opstår ved lysets større brydning i vand i forhold til luft.

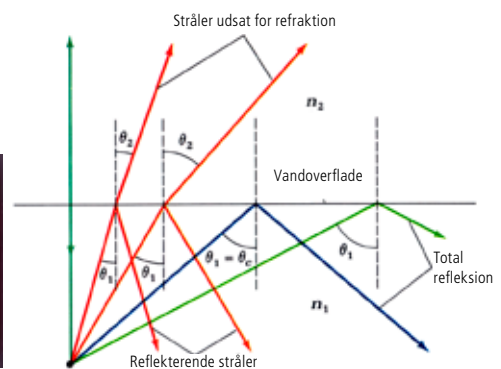


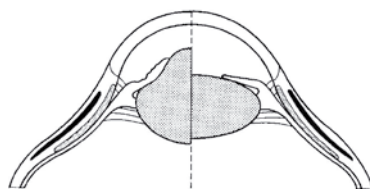
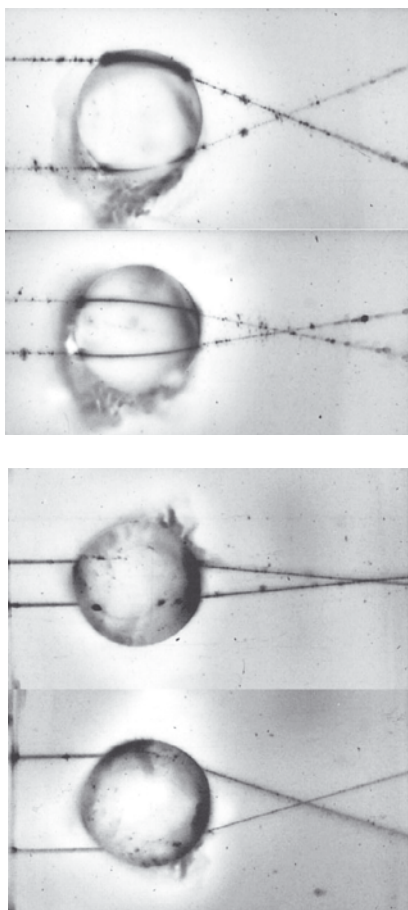
Fremstilling af den interne refleksion i et akvarium. Når bydningsvinklen mellem vand og luft er over 50 gr. reflekteres lysstålerne, som det ses på figuren.

nomenet første gang med dykkerbriller under dykning og snorkling.

Dykkerbrillerne er på en gang enkle og sofistikerede. Et enkelt plant 'glas' af plast og et vandtæt luft-rum mellem øjet og glasset er næsten nok til at genskabe den normale brydning i øjets forreste medier. Lysets absorption i vandet kan dykkerbrillerne naturligvis ikke forhindre, så farverne påvirkes ikke.

Men uden dykkerbriller behøver vi briller eller linser på de ca. +42 sf., som kan korrigere for den manglende corneale lysbrydning. Brydningsforholdet, eller brydningsindeks er jo det samme for kammer-vand, corpus vitreum og vand på ca. 1,33. Cornea har et kun lidt højere brydningsindeks, 1,36. Øjets linse er som bekendt i gennemsnit +22, og linsen kan normalt ikke akkomodere så meget ekstra. Selv det thailandske dykkerfolk, Moken folket, kan kun





Fugløjet kan akkomodere meget, fordi linsen er blød og hæfter til en senet plade. Linsen kan nærmest presses ud i forreste kammer.

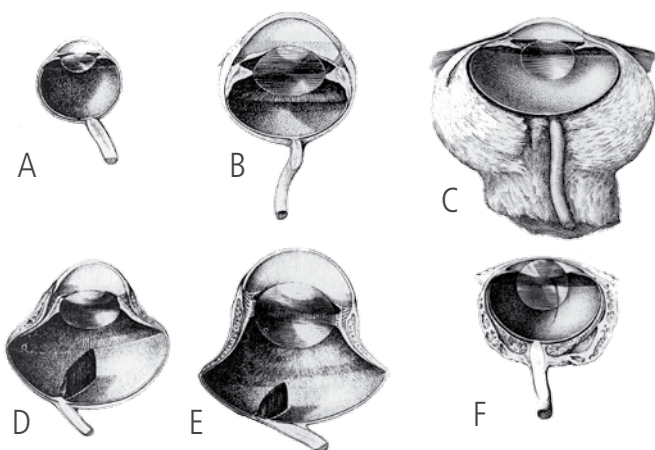
klare halvdelen ved træning, ifølge Gislén. Men det er dog dobbelt så meget som normalt.

De hvirveldyr, som lever mest under vandet, har udviklet en særlig kraftig linse, der svarer til fotografernes 'Fish eye' linse. Både fisk, sæler, hvaler og mange hajer har udviklet en kuglerund linse.

En homogen kugleformet flintglaslinse bryder mindre centralt end perifert. En kuglerund fiskelinse af samme størrelse har større brydningsindeks centralt, det giver ens brydning centralt og perifert. Og ingen billedforvrængning.



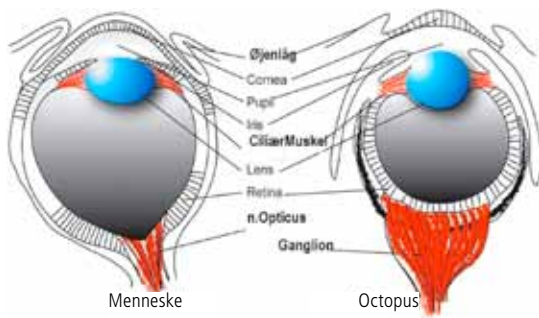
Samuel Thomas V. Soemmerring.



Figurer af øjne af forskellige hvirveldyr. Fra D.W. Soemmerring: *De oculorum hominis animaliumque sectione horizontali commentatio* (En kommentar til det horisontale snit af øjne hos mennesket og dyr). Göttingen 1818.

A: Gibraltar- eller berberabe (*Macaca sylvana*). B: Nordisk los (*Felis lynx*). C: Nord- eller grønlandshval (*Balaena mysticetus*). D: Kongeørn (*Aquila chrysaetos*). E: Stor hornugle (*Bubo bubo*). F: Torsk (*Gadus callarias*).

Lægen og biologen Soemmerings billeder (1818) giver et fint komparativ anatomisk billede af landdyrenes ovale linse i forhold til vandyrenes. Både fisk og hvaler har en sfærisk linse. Fra Ole Munks bog, *Hvirveldyrøjet*



Octopusøjet har en overraskende stor kontrastfølsomhed. Landolt C er projiceret og fotograferet på Octopusøjets bagvæg og illustrerer det gode syn hos denne blæksprutte.



Blæksprutten nautilus har et primitivt øje. Det er ikke videreudviklet gennem millioner år. Det består kun af et Camera Obscura, d.v.s. kun et stenopæisk hul, ('pinhole') og hverken cornea eller linse.

Bløddyret blæksprutten Nautilus har kunnet beholde sit enkle linseløse øje, et lille 'pinhole' gennem millioner år. Synsstyrken er da tilsvarende dårlig. En anden blæksprutte Octopus er det lykkedes at udvikle en kuglerund linse og et forbløffende godt syn, på højde med kattens, så vidt det har kunnet bedømmes anatomisk og optisk. Det er underligt, at en nær slægtning er sneglen.

Under evolutionen er den kuglerunde fiskelinse perfektioneret. Lysstrålerne brydes dårligt i periferien af en rund linse i forhold til de centrale lysstråler, hvor indfaldsvinklen er større, og den defekt er korrigeret ved, at den perifere del af linsen har en kraftigere brydning gennem et større brydningsindeks. Vor egen linse har bibeholdt denne egenskab.

Amfibiske dyr

Hvordan er det så med de amfibiske dyr, som lever over og under vandet?.

Sælen er så at sige vendt tilbage til urhavet og har efter at have haft en landdyrslinse igen fået kuglerund vanddyrslinse. Men både sæler, hvalrosser og hvaler ser næsten lige godt over som under vandet. På landjorden er sælen et par dioptrier nærsynet, og i vand skal sælen kun akkomodere nogle få dioptrier. Hvordan er det muligt?

Det skyldes, at cornea er ganske flad, og selv hvaler kan se over vandet på grund af den flade cornea.



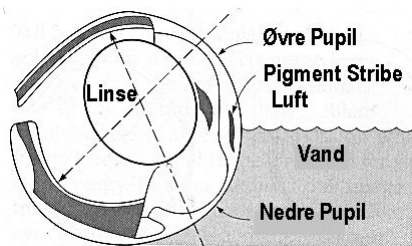
Den amerikanske Anhinga fisker som hejrer og hænger vingerne til tørre som skarven. Fugle kan akkomodere mere end pattedyr, men fiskende fugle har behov for endnu større akkomodation. De kan næsten danne en kuglerund fiskelinse. Pingvinen, som opholder sig mere under vand, har et mere amfibisk syn med en plan cornea.

Fugle, som dykker og forfølger fisk som skarven, kan akkomodere sig til et skarpt syn i vand. Det samme gælder vandstæren (C. Cinklus). Akkomodationen foregår nemlig anderledes hos fugle. Dels er linsen blødere hos fugle end hos pattedyr og dels findes en ringvulst hele vejen omkring ækvator, som er i direkte kontakt til corpus ciliare folderne. Hertil kommer, at fugle har en regulær akkomodationsmuskel, som kan tage afsæt i en ringformet brusklade i sclera. Akkomodationsmusklen er ydermere tværstribet i fugleøjet i modsætning til pattedyr, hvor muskelfibrene jo er glatte. Hos de amfibiske fugle er ringmusklen i iris og de radiale muskelfibre særligt kraftigt udviklet, og det er nok dem, som er ansvarlig for de amfibiske fugles store akkomodationsbredde. Linsen nærmest presses, squeezes ud i forreste kammer.

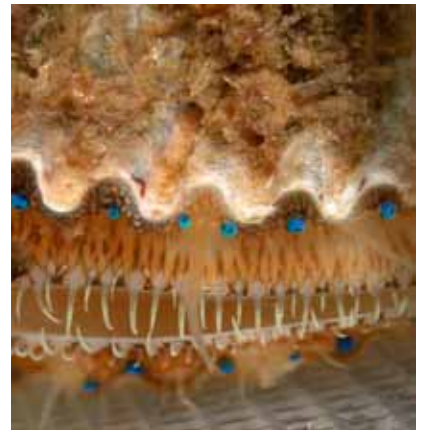
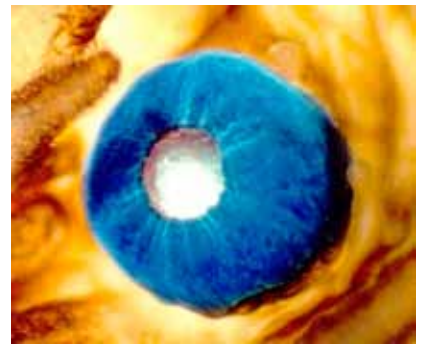


Fugle og specielt fiskende fugle har en blød linse, som nærmest kan presses fremad ved hjælp af akkomodationsmuskler, som hæfter til linsen og en benet ring. Skitsen viser fuglelinsen under akkomodation til venstre og uden til højre (efter Munk).





Den 'firøjede' fisk i den Mexicanske Golfs lavvandede områder har amfibisk syn og to nethindeafsnit. Et pigmentbånd adskiller de to afsnit fortil, og da linsen står skråt i øjet, kan anableps se smådyr både over og under vandet.



Kammuslingen (eng. scallop) har 20-40 øjne mellem tenaklerne i åbningen mellem de to skaller. Det lille 1 mm store øje har en hvid sølvrefleks (argentea).



Sælen (her spættet sæl) ser næsten lige godt over som under vandet, den er kun et par dioptrier nærsynet under vand og få dioptrier hypermetrop på land i luften. Det amfibiske syn skyldes en plan cornea.

Når linsen er den eneste effektive lysbrydende anatomiske struktur i vand, er vanddyr mere optisk begrænsede end landdyr. Udover at linsen må være stærkere, må linsen også længere frem for at få et ordentligt synsfelt.

Vanddyr har generelt en kraftigt krummet linse med en kort brændvidde i et afladt øje, og hvor retina ligger relativt tættere ved linsen end hos de landdyr, som er aktive om dagen. Hos fisk (teleoster) har vi det bedst tilpassede øje. De har det brydningsindeks, som er bedst muligt, og det maksimale højeste åbningsforhold, som svarer til fotografernes blænde, og hvis størrelse er afgørende for retinas belysning og dermed lysfølsomheden. En forøgelse af øjets størrelse får derfor

ingen betydning udover, at antallet af receptorer kan øges.

Forklaringen følger her. Åbningsforholdet defineres som den fotografiske blænde (eng. stop), som forholdet mellem diameteren (d) af pupillen eller aperturen og lensens brændvidde (f). Belysningen er proportional med kvadratet på åbningsforholdet, altså d/f^2 . Det betyder, at øger vi pupildiameteren til det dobbelte ved at gøre øjet dobbelt så stort, bliver lysmængden 4 gange så stor gennem cirkulens areal. Imidlertid bliver øjets brændvidde også dobbelt så stor, og billedets lysmængde bliver spredt ud over et 4 gange større areal, altså får vi $1/4$ belysning. Da lysmængden er 4 x større, er retinas belysning uændret på trods af større øjenstørrelse. Den nu uddøde fiskeøgle Ophthalmosaurus fik ingen glæde af sit meget store øje.

Kun hos nogle dybhavsfisk er



Ophthalmosaurus er en uddød fiskeøgle, Den havde som andre fiskeøgler meget store øjne. Navnet skyldes, at øjnene var kolossalt store. Museum for Natural History, London.



Ved mikroskopi af kammuslingens øje kan man se, at den hvide refleks skyldes et spejl, som danner et billede på muslingens retinale celler. Øjets mål ikke Mathiessens ratio (se teksten), som vanddyr linser ellers gør.

kunne registrere alt det lys, der er muligt. Hos en enkelt art har et spejl af guaninkrystaller projiceret lyset op på en ekstra fremskudt retina.

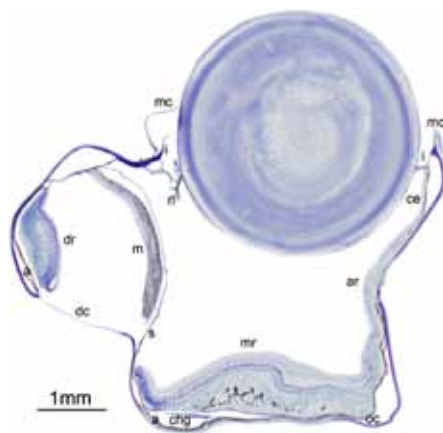
Da vanddyrene under evolutionen har perfektioneret deres øje, hvor primitivt det end har været, så har det vist sig, at alle mulige fisk og nogle andre vanddyr har haft et ret konstant størrelsesforhold imellem de anatomiske strukturer.

Fiskeøjets brændvidde (f), (afstanden mellem linsecentrum og retina) / linsens radius (r) viste sig at være omkring 2,55. Denne ratio f/r kaldes 'Mathiessens Ratio' efter beskriveren (1880).

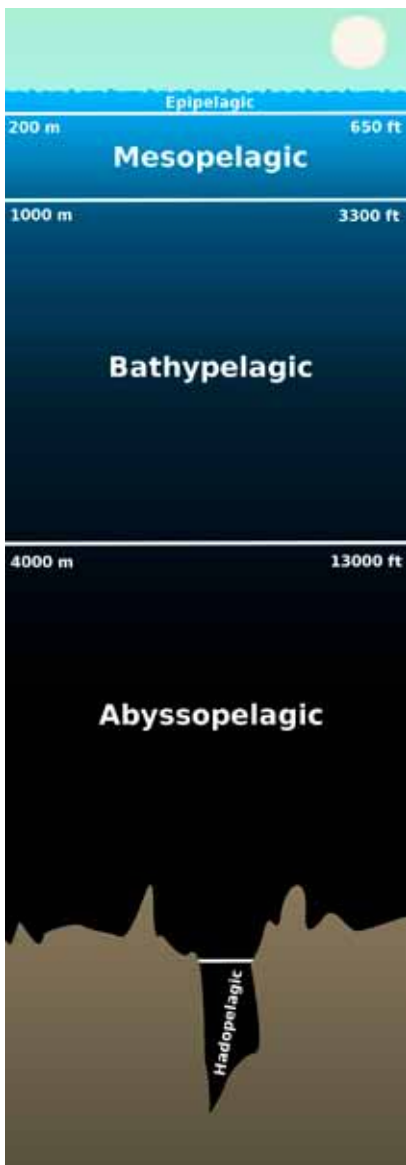
Det var en afvigelse fra Mathiessens ratio, som førte Land til en god forklaring på, hvordan kammuslingen (eng. Scallop) ser. Kammuslingen har 50-100 ganske små 1 mm store ganske smukke blå øjne, som sidder i den kappe mellem tenaklerne, som beskytter åbningen

mellem de to skaller. Vi interesserer os normalt ikke for denne uspiselige del af kammuslingen, det bliver kastet bort hos fiskehandleren. Et mikroskopisk snit afslører, at det

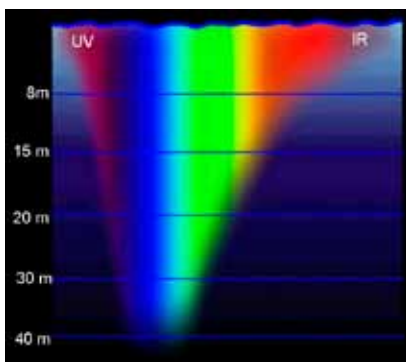
lille øje ligner et fiskeøje. Et enkelt kammer og en linse af en slags og bagved en to-laget retina. Men der er ikke plads nok mellem retina og linsen til at konvergerende lysstråler



Nogle dybhavsfisk, de såkaldte spookfish har tunneløjne, der vender opad. Andre har divertikel, som indeholder et guaninkrystal spejl, som reflekterer stråling nedefra mod en accessorisk retina. Der er vist *Opistoproctus Soleatusi* og den fire-øjede *Doloichopteryx longipes*.



De forskellige oceanlags dybde. Lysets aftagen mod dybet er markeret med tiltagende sort.



Med tiltagende havdybde forsvinder lyset gradvist. Det langbølgede røde lys forsvinder først.

kan fokuseres. Der behøves mindst 1,5 linseradier for en 'Mathiessens linse' og gerne 2,5 svarende til en fiskelinse.

Forklaringen på dette fik Land, da han tilfældigt så et omvendt billede af sig selv i dissektionsmikroskopet. Han så et spejlbillede. Indersiden af kammuslingens øje er nemlig kuglerundt og beklædt med et blågrønt reflekterende spejl, 'argentea' efter sin sølv-glans.

Kammuslingens spejl er specielt ved at funktionen er at danne et billede, hvor andre dyreøjnes spejle, 'tapetum lucidum' er at fungere som reflektor. Tapeter findes mest hos dyr, der er aktive om natten, det sørger for at fotoner, der allerede er fokuseret, får en chance ekstra til at ramme receptoren, hvis det ikke er lykkedes i første omgang.

Tapetet kan bestå af forskellige stoffer. Alle med et højt refraktivt indeks. Aflange guanin krystaller ($n=1,83$) lidt over blodlegemestørrelse findes i mange fisk og hajer. Hos landdyr ofte riboflavin og et zink-



Med vandscooter og dykkerbriller kan man opføre sig som en fisk i vandet og se isbjeget grundstødt. Hvis man hverken fryser eller har klaustrofobi.



Ved Blåkilde nær Rold Skov i Jylland er kridtlaget i undergrunden tæt ved overfladen, og man kan da tydeligt se vandets blå farve, som altså ikke er genskin fra en blå himmel.

cystein salt. Vi har også et 'tapetum fibrosum', som består af collagen, og som minder om muskelseners spejling.

En særligt 'tapet' findes i nogle havørred (eng. Seat-rout), idet nogle vandrende (migratoriske) melanomer nok har den dobbelte funktion at dels beskytte stavene i dagslys og også beskytte tappene mod tilfældigt spredt lys.

Farverne i vand

Vand er blåt, farven er ikke alene en spejling af den blå himmel, men skyldes at de lange rødlige bølgelængder absorberes. Den blå farve kommer tydeligt frem på en hvid baggrund, for eksempel ved Blåkilde nær Rebild Bakker, hvor kridt i undergrunden kommer frem til overfladen, ellers ved koralrev og svømmehaller.

Også frosset vand, is, er blåligt. Grønlands isbjerge ses med blåligt



Det grundstøtte isbjerg set fra oven, og den fastpressede is ses blå som almindeligt vand.

I den bathypelagiske dybde (1-4 km) har fiskene indrettet sig på den sparsomme føde. Munden er stor, muskulaturen er ringe for at spare energi. Alle antennerne er ude for at give lys i mørket. (*Chauliodon danae*, som blev fundet på 1. Galathea ekspedition). Reproduceret efter Wagner et al. Cur. Bul. Elsvir.



skær, som ikke alene skyldes det klare vand.

Isotopen deuterium i tungt vand, D₂O giver derimod farveløst vand.

I havet tiltager lysabsorptionen hurtigt med stigende dybde og i dybhavet mellem 1 og 4 km's dybde er der intet helt nat og sort. Så helt i dybet må flere fisk derfor fabrikere deres eget lys ved bioluminescens.

I tussmørkezone er fiskene ofte monokromater, og deres retinae har kun stave og derfor kun et synspigment. Det har ofte absorptionsmaksimum i det blå spektralområde, hvor lystransmission er størst i denne havdybde. Det skulle give størst følsomhed for opfattelse af bevægelser.

De dybhavsfisk, som kan udsende lys ved bioluminescens, kan udsende kortbølget blå lys, som staven er følsomme for. Andre dybhavsfisk har den ekstra finesse, at de både



Dybhavstudsefisk, *Oneiides Macrost*, lever i nattemørket og har sit eget bioluminescens-lys.

kan registrere og udsende blå lys, men også langbølget rødt lys, med et maksimum omkring 700 nm. Det ekstra røde lys er usynligt for andre byttedyr, som kun har de blå følsomme stave.

Når disse fisk har to synspigmenter, har de også potentialet til at være dikromater og derved kunne se blålig og rødlig udstråling, ikke bare ved monokrome forskelle i lyshed, men også ved forskelle i farvekulør.

Vandpattedyr har generelt de samme to tap typer som de fleste pattedyr, med undtagelse af menneskeaberne. En kort- og en langbølget tap kan genfindes hos enkelte sæler, delfiner og amfibier som sirener (sø-køer), oddere og flodheste. Derimod har immunkemiske og molekylærgenetiske studier vist, at hvaler og sæler generelt mangler det kortbølgede 'blå' pigment, de er 'grøn' monokromater.

Nu har vi set vidt omkring i den komparative naturhistorie og kan vel sige helt som den gamle Nobelpristager, August Krogh, at der næppe er nogen fysiologisk problemstilling, som der ikke er løst i dyreverdenen og derfor er en dyremodel for. Det er forbløffende, som synsapparatet kan udvikles i alle retninger og til perfektion, hvis der viser sig at være behov for det.

Referencer:
www.oftalmolog.com

Referencer:

- Gislén, A., Dacke, M., Kröger, R.H.H., Abrahamsson, M., Nilsson, D.-E., Superior Underwater Vision in a Human Population of Sea Gypsies. *Curr.Biol.* 13, 833-836.
- Greibel, U., Peichl, L.: Colour vision in aquatic mammals – facts and open questions. *AquaticMammals*, 2003, 18-30
- Hanke, F.D., Dehnhardt, G., Schaeffel, F., Hanke, W.: Corneal topography, refractive state, and accommodation in harbour seals (*Phoca vitulina*). *Vision Res.* 2006, 46, 737-747.
- Howland, H.C., Sivak, J.G. Penguin vision in air and water. *Vision res.* 1984, 24, 1905-1909
- Land, M.F., Nilsson, M.F.: *Animal Eyes*. 2002 (2008ed.), Oxford Univ Press.
- Munk, O.: *Hvirveldyrøjet*. Bygning, funktion og tilpasning. 1980 Berlingske forlag.
- Schwab, I.R., Roth, A., Blankenship, T.N., Fitzgerald, P.G.: *Tr.Am.Ophthalmol.Soc.* 2001, 99, 145-156.
- Sivak, J.G.: *Through the Lens Clearly: Phylogeny and Development*. *Invest.Ophthalmol.* 2004, 45, 740-746.
- Sivak, J.G., Howland, H.C., Weest, J., Weerheim, J.: The eye of the hooded seal, *Cystophora cristata*, in air and water. *J.Comp.Physiol.A.*, 1989 165, 771-777
- Wagner, H., Douglas, R., Frank, T., Roberts, N., Partidge, J.: A Novel Vertebrate Eye Using Both Refractive and Reflective Optics. *Current Biology* 2008, Weale, R.A.: *Natural History and Optics*. 1974 Ch.1., i vol.6 *Comparative Physiology i The Eye*. Ed. H.Davson, Academic Press.

Endnu ikke udkommet: men nov 2011. Ivan Schwab: *Evolutions Witness. How the eyes evolved*. Oxford Univ Press.