

Funktionelle Biologische Systeme

! Funktionen

! Natur vs. Technik

**! Natur für die Technik – Bioinspiration
 Biomimetik**

➤ Hören statt Sehen

- Echoortung: Fledermäuse
- Echoortung: Delphine

➤ Sich Zurechtfinden

- Blinde: Schall zur Orientierung
 - Stock mit US-Wandler; taktils Feedbacksystem (Robocane)
- Künstliche Netzhaut

• Vom Boden abheben

- Flugtechnik
- Insektenflug
- Möve (Festo)

➤ Robotik

- Humanoide Roboter – biomimetische Maschine
- Geklonte Roboter, evolutive Roboter, etc.
- Künstliche Intelligenz (KI)
- Zur autonomen Lösung komplexer Aufgaben (Tiefsee, Katastrophen, All)

➤ Kooperatives Verhalten

- Schwarmintelligenz
- sich erkennen, lernfähig
- Energieschonend
- Ressourcenschonend

- Fortbewegung im Wasser
 - Auftriebssysteme
 - Tariansysteme
 - Vortrieb – oszillierend Flossen (Seenadeln)
 - Rückwärtsgang(?)
 - Nichtrotierende Antriebe (Schädigungsgefahr geringer)
 - Unterwasserfahrzeuge (AUV, ROV)
 - (Energie- und Atmungssysteme (Physikalische Kiemen))

- Fortbewegung an Land
 - Laufroboter – Insekten
 - In alle Richtungen laufen (Taschenkrebse, Winkerkabben)
 - Seitwärts Laufen!
 - Steuerungssysteme (wenige Neurone bei Insekten)

- Mimikry – Versteckspiel
 - Chromatophoren
 - Plattfische
 - Kopffüßer (Tintenfische)

- Anhängen – Haftsysteme
 - Nasse und trockene Adhäsion
 - Kleben und Lösen
 - Haftkraft
 - Haftstrukturen Haken und Ösen
 - Fouling – Antifouling

- Unterwasserchemiker
 - Silikatskelett
 - Kalk
 - Mikolinsensystem

➤ Hart und weich

- Weich – Fluchtmöglichkeiten
- Hart – Fraßschutz
 - Seegurken, Schleimaal
- Biomedizinische Anwendungen
 - Ethylenoxid-Epichlorhydrin Matrix mit Cellulosefasern - steif; + Wasser verflüssigt

➤ Form folgt Funktion

- Termitenhügel
 - Luftzirkulation ohne Energie
 - Nord-Süd-Ausrichtung
 - Natürliche passive Kühlung
 - Kühlkonvektion
 - Lehm- und Passivhäuser



➤ Halt finden

- Eingraben im Sand
 - Rissfortbildung bei Vielborstern (Druck – Riss – Sinken lassen – Verdicken – Rissfortpflanzung)
- Fortbewegen im Sand
 - Sandfisch
 - Schermesserfisch
- Ankersysteme im Sand
 - Scheidenmuschel (Roboclam)
 - (Veränderung der Umgebung – Fuß verdicken)



➤ Ressourcenschonung

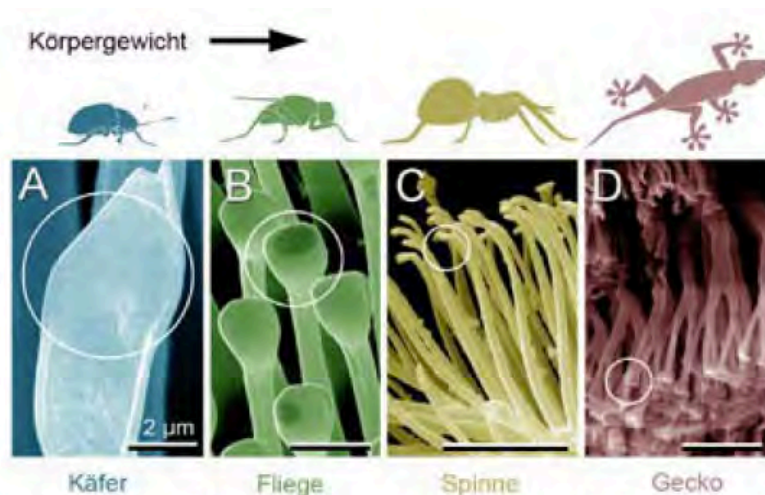
➤ Sparsamer Materialeinsatz

- Leichtbau (Vogelskelett)

- Nachhaltigkeit
- Green Technologies

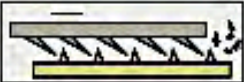
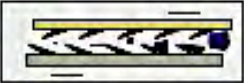
Haftsysteme

Oberflächenstrukturen, Oberflächenspezialisierungen



Haarige Haftstrukturen entstanden im Laufe der Evolution unabhängig voneinander in verschiedenen Tiergruppen. Je größer und schwerer die Tiere sind, desto feiner, dichter und zahlreicher sind Hafthaare an ihren Füßen vorhanden.

Abbildung 1: Rasterelektronenmikroskopische Detailaufnahmen von Hafthaaren (aus Gorb 2005)

Struktur	Wirkungsprinzip	Biologische Beispiele	Technische Prüfmethoden	Beispiele für technische Anwendungen
 aerodynamisch aktive Oberfläche	Reibungsminimierung	Insektenflügel, Haifischhaut	Widerstandsmessung im Windkanal, biotribologische Messmethoden	Luftwiderstand-minimierende Polymerfolie von 3M
 Putzstrukturen	Reibungsmaximierung und Adhäsion	Insektenbeine	biotribologische Messmethoden	
 lautzeugende Oberflächen	Reibungsmaximierung, mechanische Verklammerung	Zikaden, Grillen, Heuschrecken, Käfer	biotribologische Messmethoden	
 Strukturen zur Nahrungszerkleinerung	Reibungsmaximierung (Abrasion)	Zähne, Mundwerkzeuge, Kaumägen	biotribologische Messmethoden	selbstschärfende Schneidewerkzeuge
 Filtrationsvorrichtungen	Reibungsmaximierung und Adhäsion	Mundwerkzeuge bei Fliegen, Filtrationsvorrichtungen bei Meeresorganismen	biotribologische Messmethoden	aktive Filtersysteme

 hydrodynamisch aktive Oberfläche	Reibungsminimierung oder Reibungsmaximierung	Haifischhaut, Plankton	biotribologische Messmethoden	
 Strukturen zur Luftrückhaltung	Adhäsion, Benetzbarkeit	Plastron der Wasserinsekten (Atmung unter Wasser), Blätter der Wasserfarne	biotribologische Messmethoden, Oberflächenchemie	unter Wasser trocken bleibende Textilien
 Strukturen zur Thermoregulation, Verdunstungsschutz	mehrfache Reflexion	Körperkühlung bei Schmetterlingen und Honigbienen	Spektroskopie	
 Körperfarbmuster zur Kommunikation, Tarnung	Reflexion, Interferenz, Diffraction	Insektenflügel	Farbspektroskopie	neuartige multifunktionale optische Oberflächen
 Anti-adhäsive, nicht benetzbare (selbstreinigende) Oberflächen	Minimierung der Kontaktfläche zwischen Schmutzpartikeln und Substrat	Pflanzenoberflächen (z. B. Lotus, Kohl), Insektenoberflächen (z. B. Libellenflügel)	Kontaktwinkelmessung, Bestimmung der Oberflächenenergie	Fassadenfarbe, Antihafbeschichtungen
 Anti-Reibungsflächen	Reibungsminimierung, Schmiereffekte	Tierische Gelenke, Fisch- und Reptilienhaut	biotribologische Messmethoden	Mikroelektromechanische Systeme (MEMS)
 Anisotrope Reibung	Reibungsminimierung, Gleiten	gerichtete Bewegung, z. B. Beförderung von Gegenständen	biotribologische Messmethoden	Förderbänder
 Haftsysteme	Reibungsmaximierung, Adhäsion	Füße, Mundwerkzeuge, biologische Greifsysteme, Fixierungssysteme	biotribologische Messmethoden	Haftmaterialien, „gecko adhesive“, industrielle Greifer, Autoreifen

Tabelle 1:
Biologische Mikrostrukturen auf Oberflächen, ihr Wirkungsprinzip, biologische Beispiele und biomimetisches Potenzial (aus Gorb 2006a).

Sehsysteme

Linse

Pupille

Netzhaut

Stäbchen / Zapfen

Sehnerv / Gehirn

✧ **Scharfsehen**

✧ **Nachtsehen**

Katzen (Tapetum lucidum – leuchtender Teppich)

✧ **UV-Sehen**

✧ **Rundumsehen**

✧ **Teleskope (Wolter Radioteleskope)**

Klaus Vogt (1945-2008; u.a. in Stuttgart; Freiburg)

✧ **Unter Wasser sehen**

Sehen unter Wasser

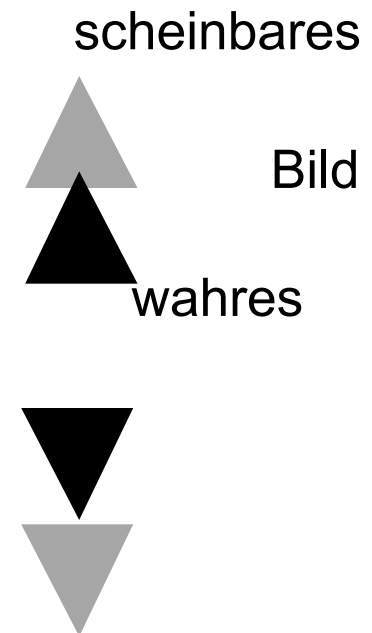


aus: VDST Lehrfoliensatz

Sehen unter Wasser

Luft - Glas - Wasser

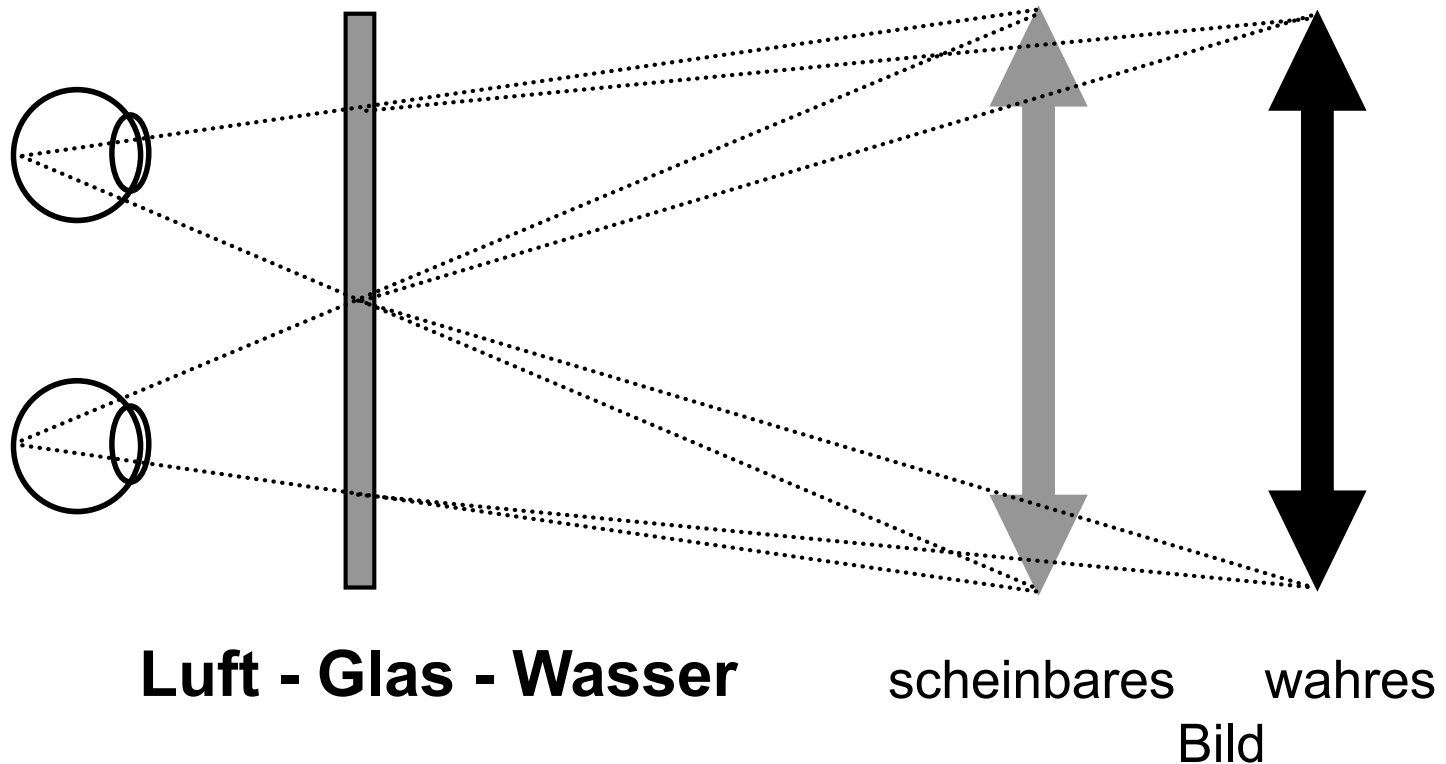
Brechung des Lichtstrahls



Das scheinbare Bild wirkt $\frac{1}{3}$ größer

aus: VDST Lehrfoliensatz

Sehen unter Wasser



Luft - Glas - Wasser

scheinbares

wahres

Bild

Das scheinbare Bild wirkt $\frac{1}{4}$ näher

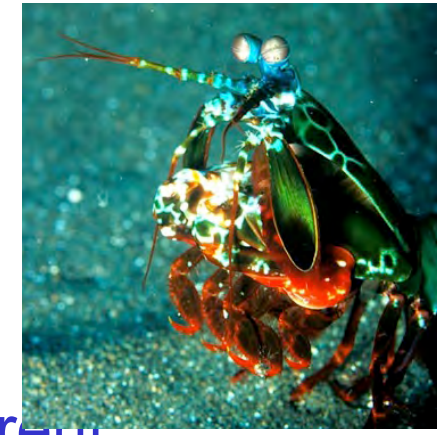
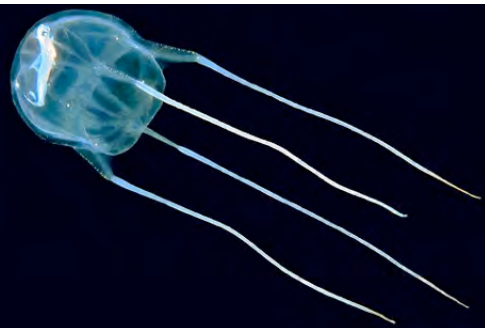
aus: VDST Lehrfoliensatz

Sehen unter Wasser



- ✧ an Sehschwäche angepasste optische Gläser
- ✧ bifokale Ausstattung

Sehen unter Wasser



Winkerkrabben (*Uca* sp.)



Perfekt an flache Lebewelt angepasst

**gestielte, bewegliche Augen
haben Überblick; sehen von oben herab**

**frühe Erkennung der Feinde
sich nähernde Person in 100 Meter
anfliegender Vogel ab 17 Meter**



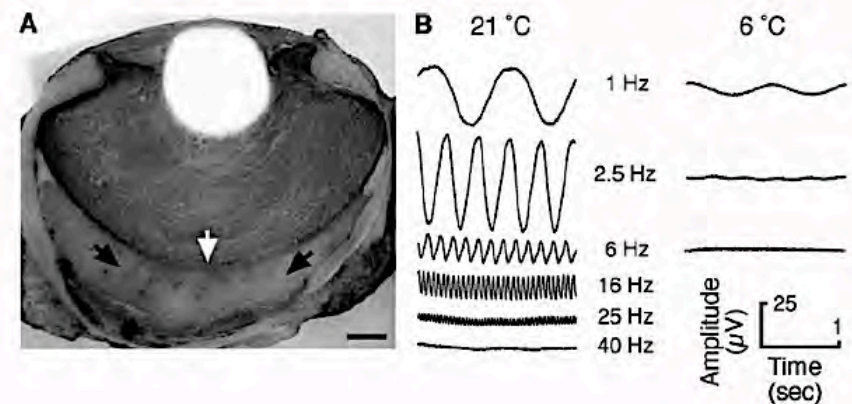
**Können Größe „abschätzen“ über
Position der Abbildung auf der Retina**

Schwertfisch – mit gewärmten Augen sieht Fisch besser



Jäger - auf präzises Sehen in kalten Tiefen angewiesen

**spezielle Blutversorgung der Retina
+ 10 bis 15°C über der Wassertemp.
bis zu 10fach bessere Auflösung**



Schwämme (Porifera)



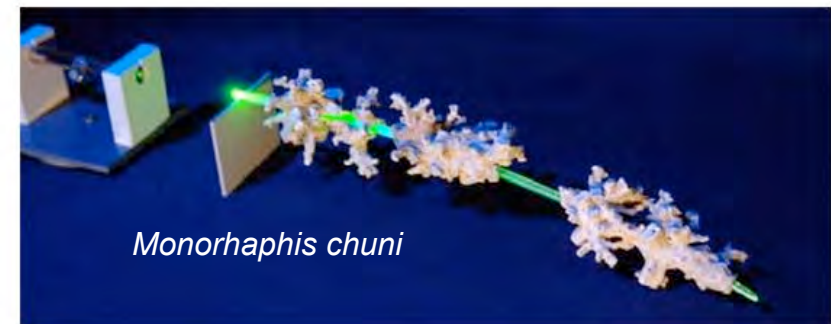
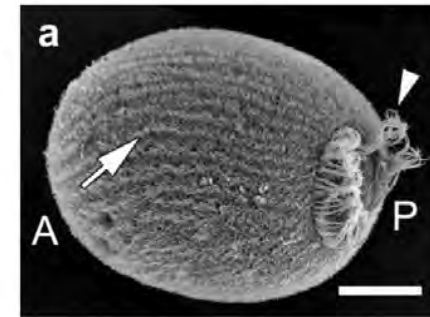
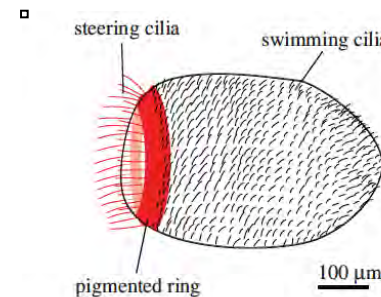
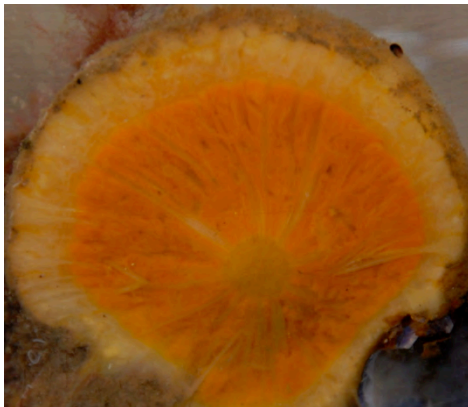
Hornschwamm



Glasschwämme

Schwämme – ohne Nerven Lichtwahrnehmung und -leitung

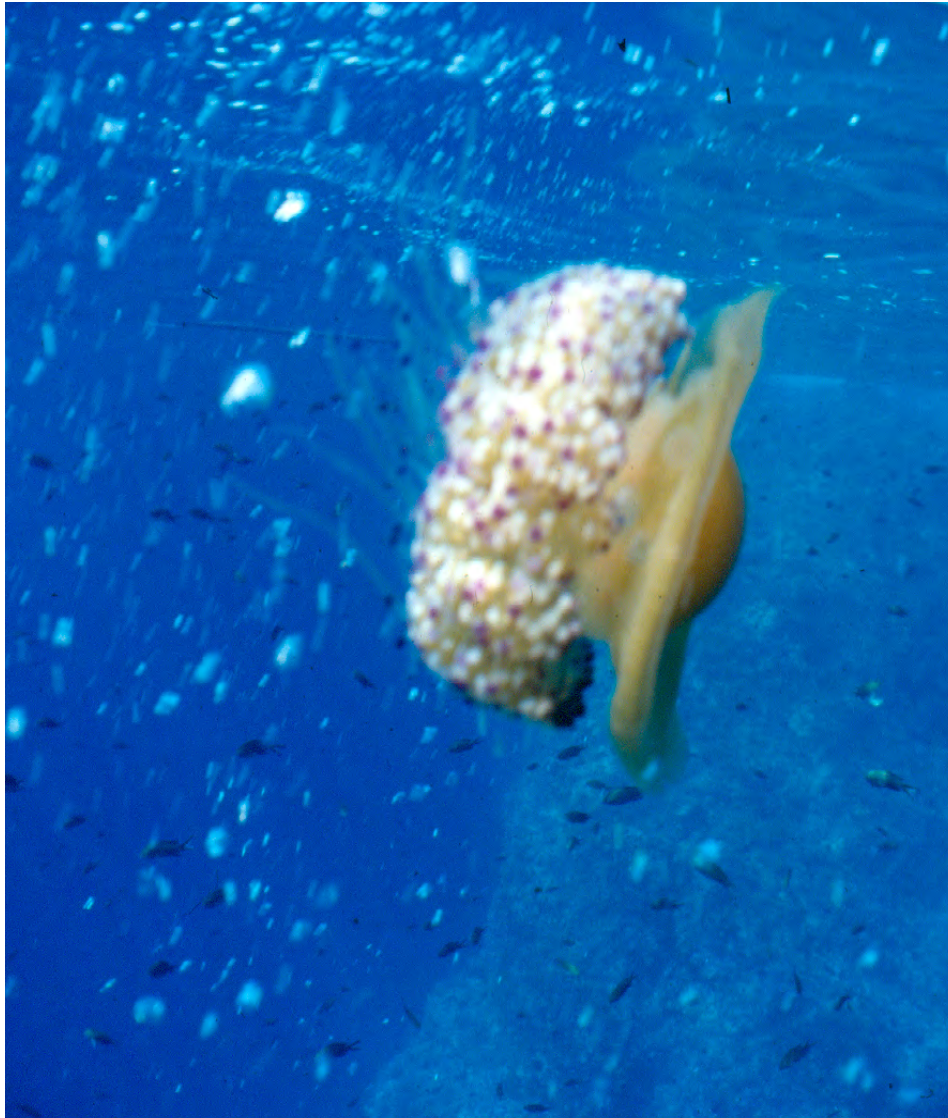
**Larven „sehen“ mit Cilien
spektrale Empfindlichkeit
Bioglasfasern als Lichtleiter
Neues „Sehsystem“ für Tiefsee**



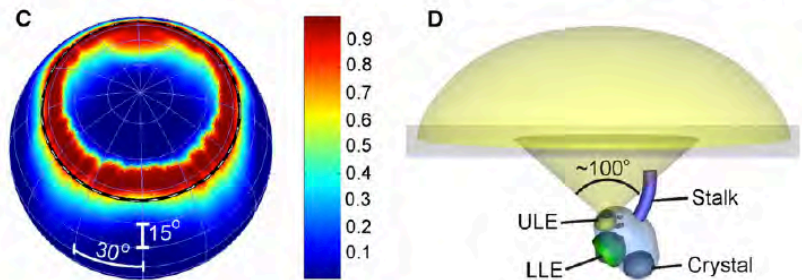
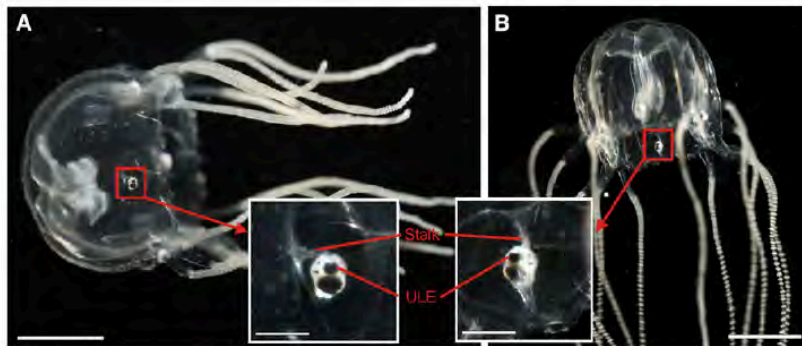
Brümmer et al. (2008)

Leys et al. (2002); Müller et al. (2008)

Quallen (Würfelquallen)



Quallen – mit 24 Augen (4 Typen) unterwegs!

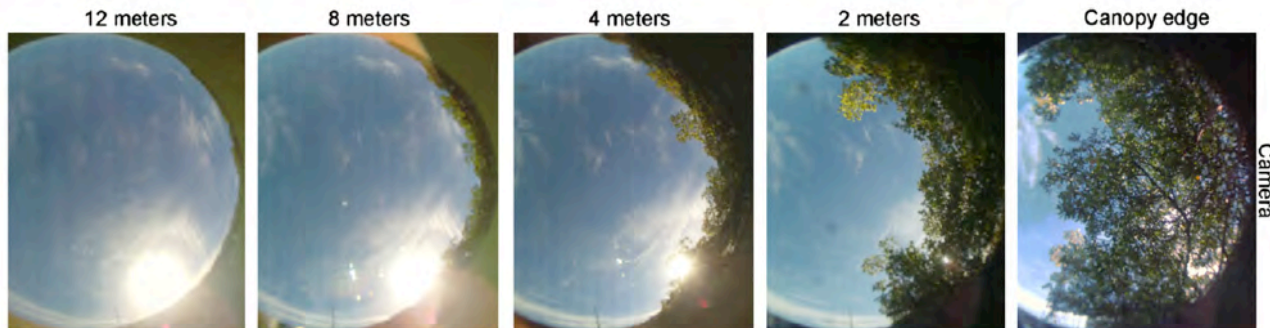


4 Rhopalia mit je 6 Augen

**oberes Linsenaug gestielt
immer nach oben gerichtet
Statolith als Orientierung**

fast vollständige Rundumsicht

Orientierung in Mangroven



Käferschnecke (Chiton)

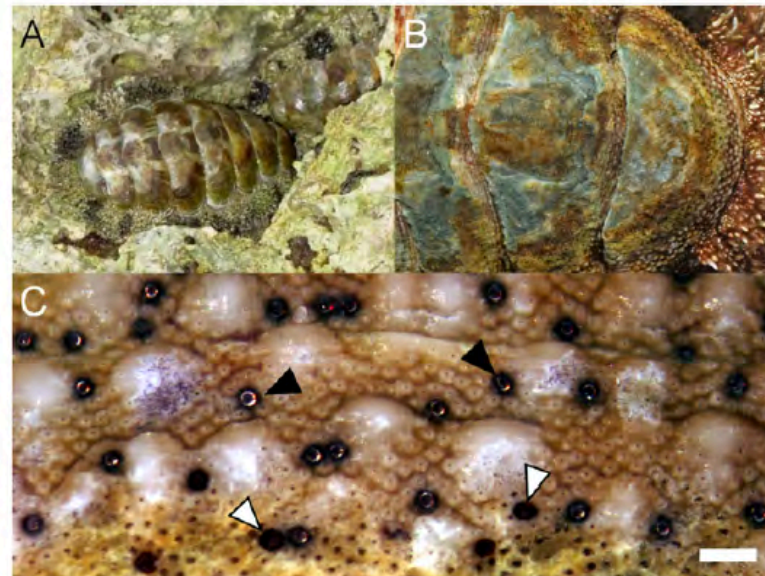
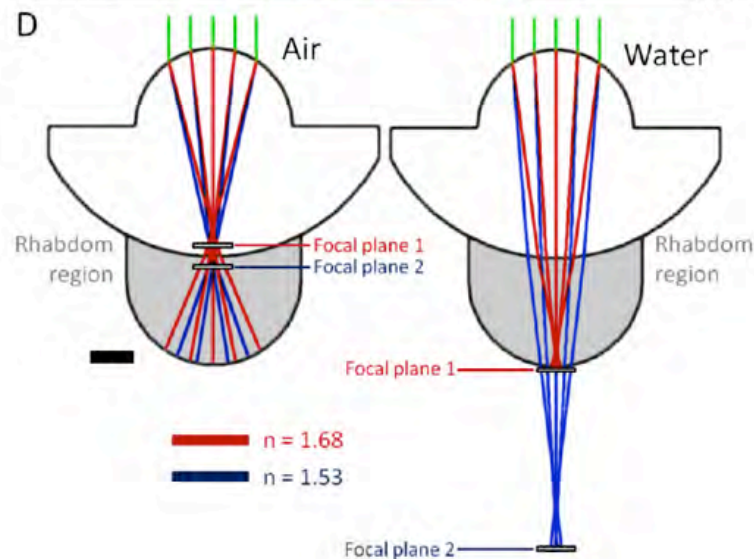
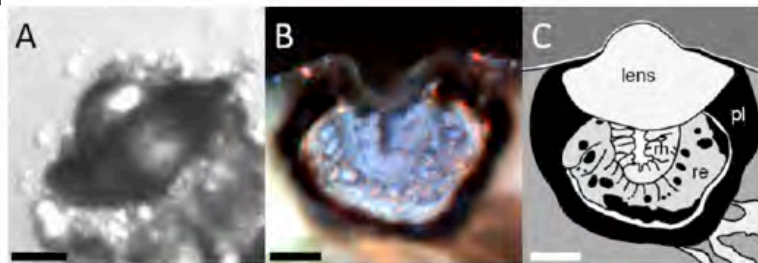


Käferschnecke – sehen mit Hunderten von „Steinchen“

Hunderte von Ocellen seitlich
Ocellus = Pigment + Retina + Linse

Aragonit-Linsen (Kalk)

Hell/Dunkel- und Formen-Sehen
in Wasser und Luft



Gelbrandkäfer & Larve

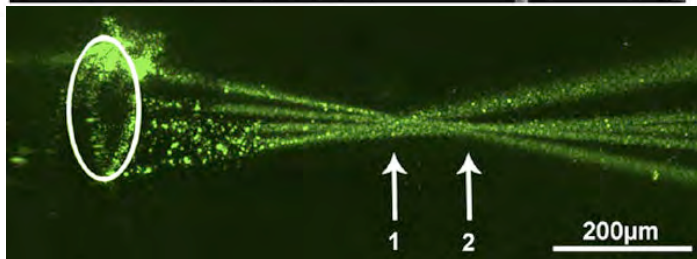
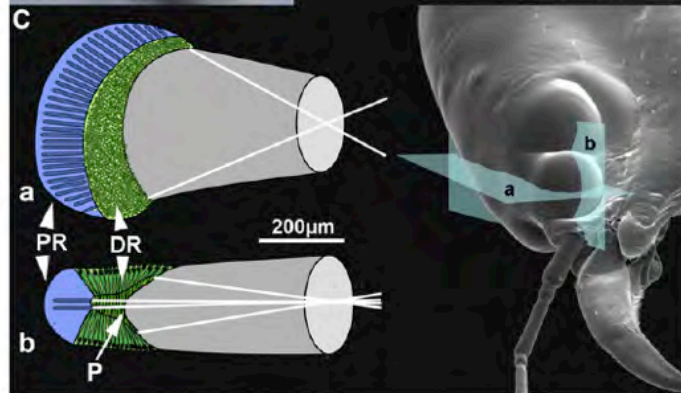
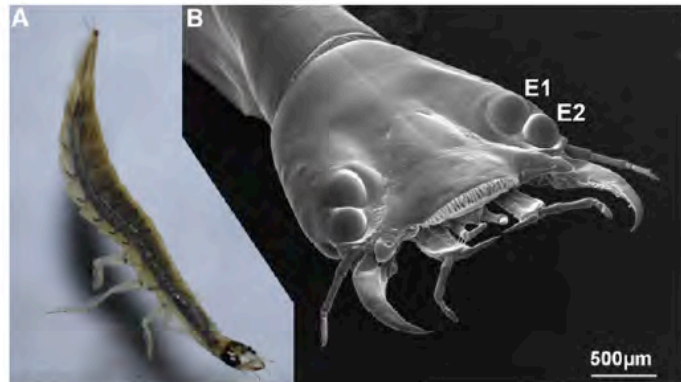


Gelbrandkäferlarve – zwei Augen in Einem

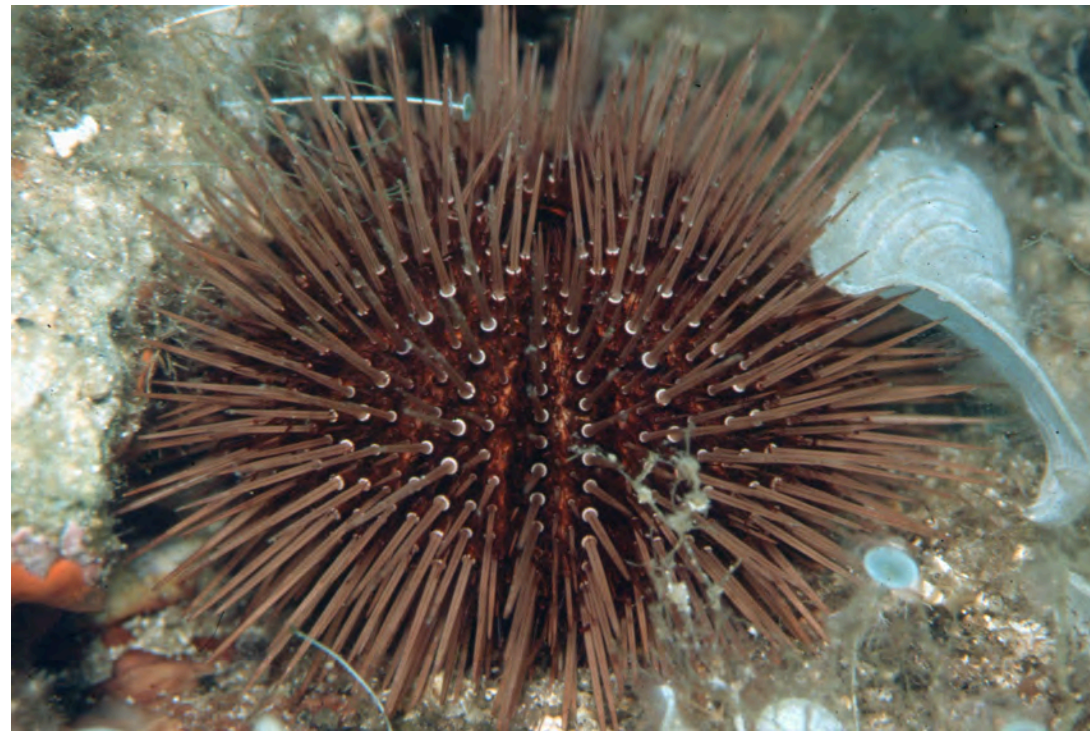
Eine Linse – zwei Retinae
Retina liegt unterschiedl. tief
Gleichzeitig scharfes Nah- und Fernbild

Echtes bifokales Sehen

wichtig bei Jagd nach Beute



Seeigel (Stachelhäuter)



Seeigel – ein „laufendes Komplexauge“

Seit 150 Jahren Lichtreaktionen bekannt

Photorezeptoren in Ambulakralfüßchen
Skelettvertiefungen zur Abschattung
Richtungswahrnehmung möglich
Kalkskelett als Komplexauge

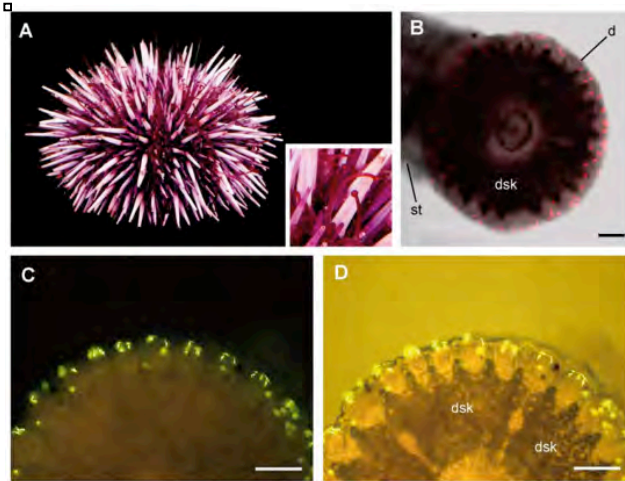
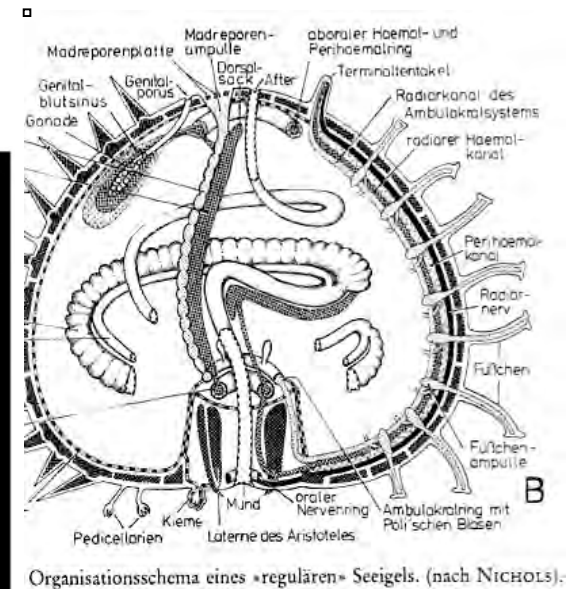
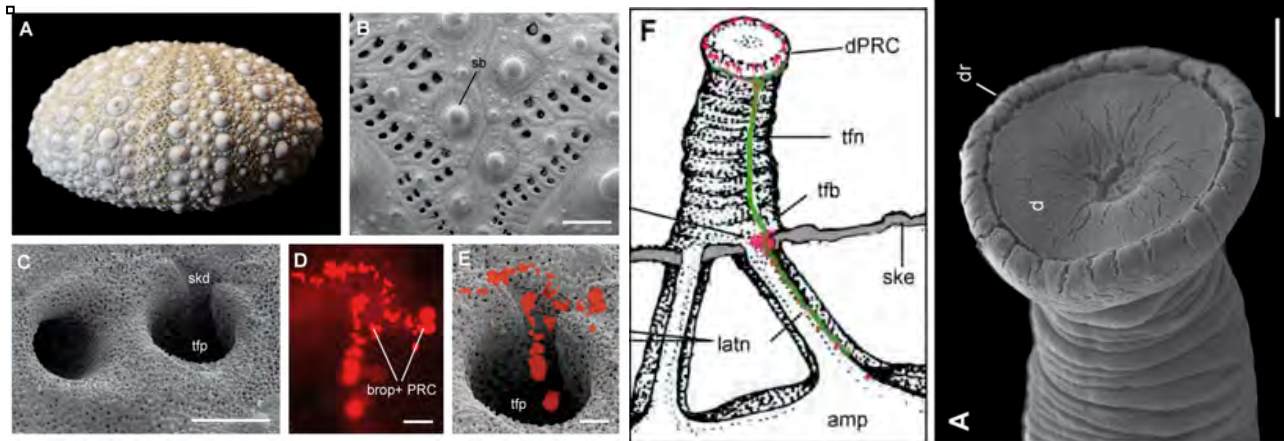


Fig. 1: R-opsin positive PRCs in the tube foot disc of *S. purpuratus*. A. Adult animal. Inset: tube foot. Photograph courtesy of M. Ormestad/Kahikawai, Hawaii. B. Color merge of CLSM z-projections showing tube foot with stalk (st), disc (d) and disc skeleton (dsk). Anti-Sp-opsin4 immunolabeling shows single PRCs (red) located in the rim of the tube foot disc. C. Tube foot disc in top-view with r-opsin positive PRCs (yellow) grouped in epidermal bulges. D. PRC arrangement and calcite tube foot disc skeleton (rosette). Scale bars in B-D: 100 µm.



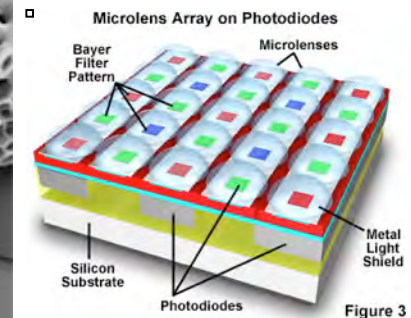
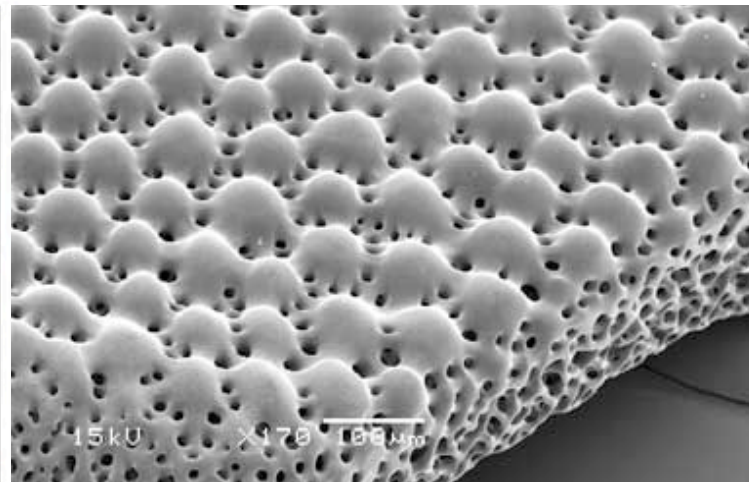
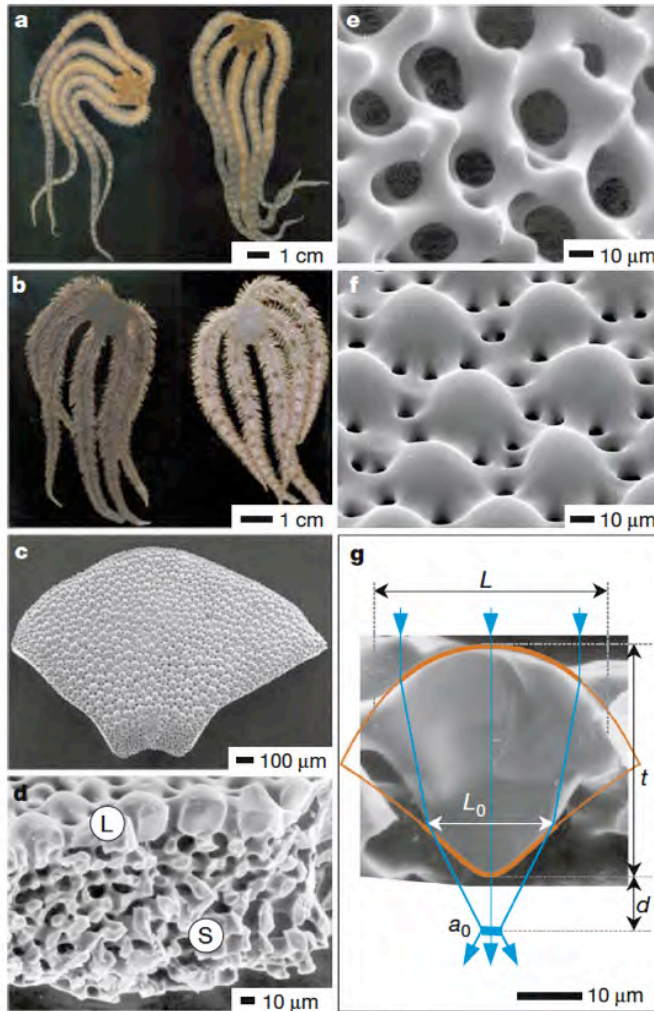
Schlangensterne (Stachelhäuter)



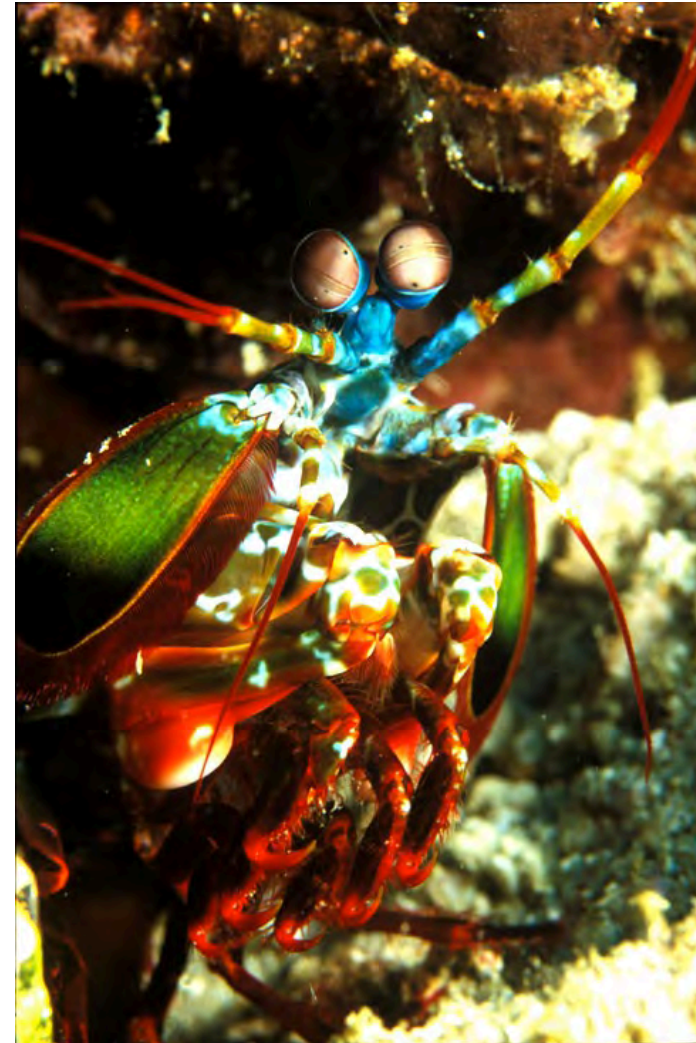
Schlangensterne – Mikrolinsen hoher optischer Güte aus Kalzit

Lichtempfindliche Schlangensterne
stabile Mikrolinsen sind Einkristalle
Mikrolinsen fokussieren auf Nervenbündel
kaum Abbildungsfehler; wachsen nach
„Sonnenbrille“ durch Flüssigkeit aus Poren

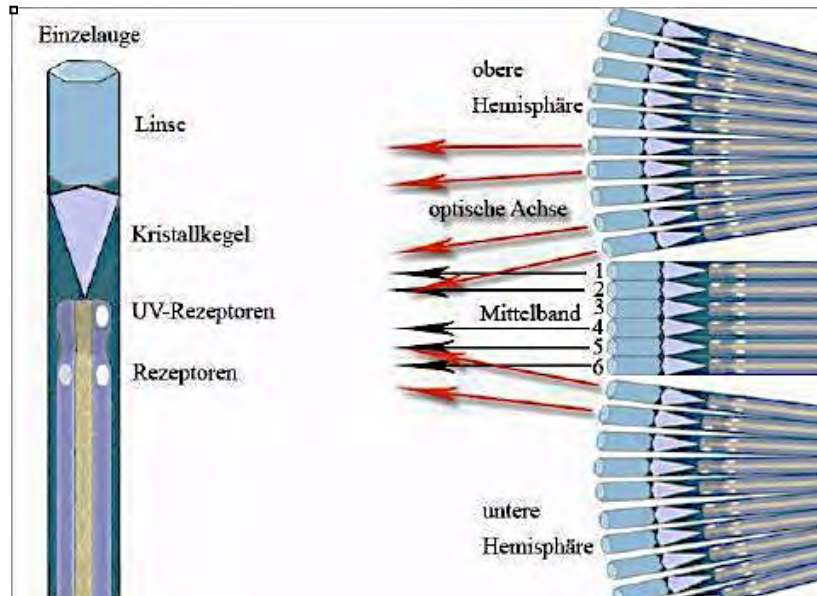
Mikrolinsen-Arrays in der Nano-Technik



Fangschreckenkrebs



Fangschreckenkrebs

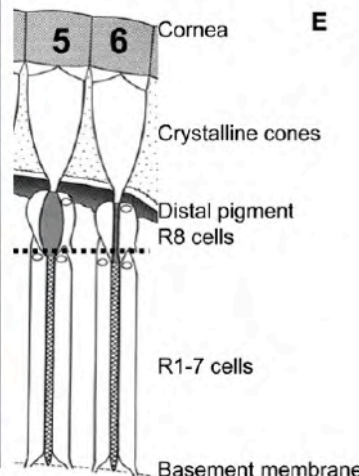
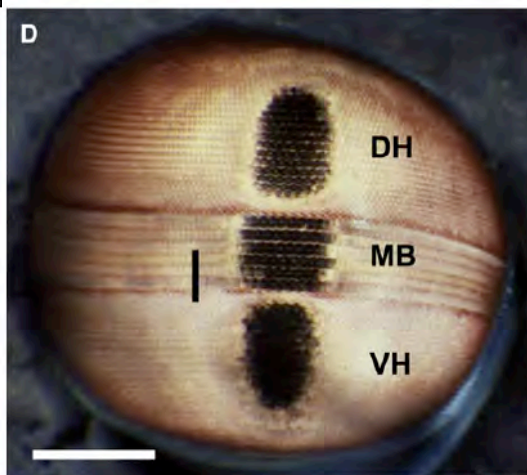


Auge aus bis zu 10.000 Einzelaugen

auffälliges Mittelband aus 6 Reihen

**erkennt bis zu 100.000 Farben (1-4),
polarisiertes Licht und UV-Licht (5-6)**

**Kommunikation über Farbsignale
Pseudopupillen (schwarze Flecken)**



Seezigeuner

Kinder der Seezigeuner Moken, Burma

Kinder sammeln marines Getier vom Meeresboden ohne Tauchmaske

hohe Gittersehschärfe (6.06/2.95 Zyklen/Grad

Verengung der Pupille (1,96/2.50 mm)

Akkommodation bis zu 15-16 Dioptrien!

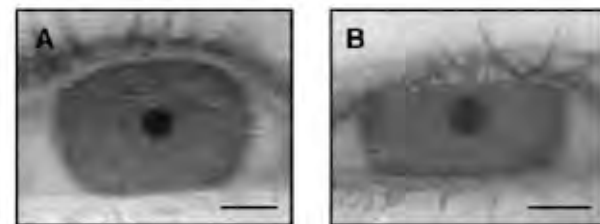
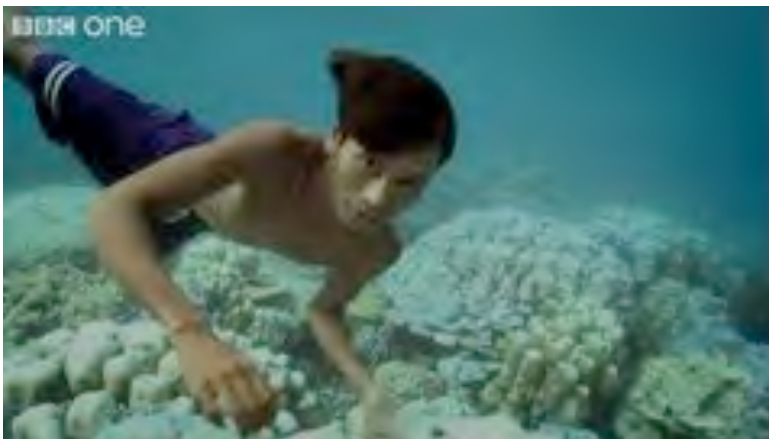
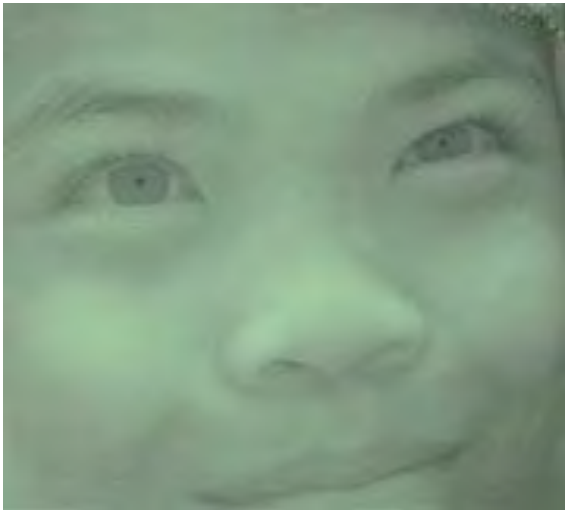


Figure 2. Images of Pupils Underwater

The pupil of a Moken child (A) is smaller than the pupil of a European child (B). Both images were taken with infrared light. Scale bars = 4 mm.

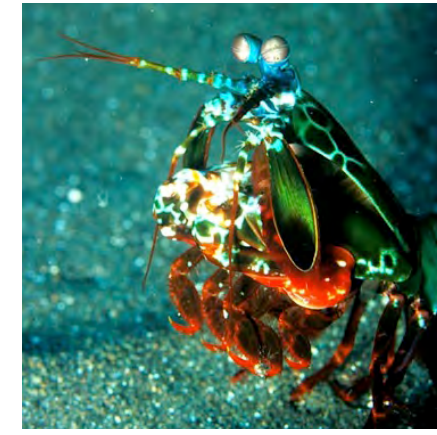
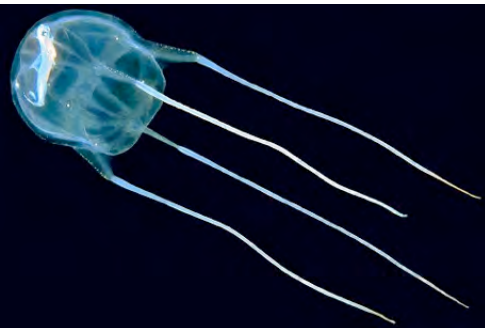


Zusammenfassung

- Tierreich bietet faszinierende Problemlösungen
- Komplexe Systeme (Hard- und Software)
- Möglichkeiten für bioinspirierte Materialien
- Sehr spezialisierte Anpassungen an unterschiedlichste Lebensräume, an Ernährungsstrategien und innerartliche Kommunikation
- Marine Organismen sehen mehr als vermutet!

Fotos & Abbildungen:
H. Frei, P. Munzinger,
W.E.G. Müller, F. Brümmer,
aus zitierten Originalarbeiten

Sehen unter Wasser



Funktionelle Biologische Materialien und Systeme

- ! Neue Materialien**
- ! Natur vs. Technik**
- ! Komposition und Hierarchie**
- ! Natürliches Design**

Bioinspiration
Biomimetik