

25 Jahre Elektronen-Mikroskopie an der Neuen Kantonsschule Aarau

Autor(en): **Foelix, Rainer / Erb, Bruno / Wullschleger, Benno**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Mitteilungen der aargauischen Naturforschenden Gesellschaft**

Band (Jahr): **38 (2016)**

PDF erstellt am: **19.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-675294>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

RAINER FOELIX, BRUNO ERB UND BENNO WULLSCHLEGER

25 Jahre Elektronen-Mikroskopie an der Neuen Kantonsschule Aarau

25 years of electron microscopy at the Neue Kantonsschule Aarau (NKSA)

Normally only universities can afford high-tech instruments such as electron microscopes and they are practically never found in any public schools. However, our school was very fortunate to obtain (at no charge) both a scanning electron microscope (SEM) and a transmission electron microscope (TEM) from the ETH Zürich and the Max-Planck-Institut Tübingen when these instruments were no longer used there. These microscopes were technically in prime condition and have been used for teaching and research at our school for many years since. About 20 000 pictures, mostly of biological subjects, have been taken over the years; they provide a rich basis for biology lectures and for many publications in popular and academic journals. Here we are presenting some highlights from 25 years of electron microscopy at our school, covering a large variety of zoological and botanical objects, and even of fossil samples dating back to Triassic and Jurassic times.

Zusammenfassung

Normalerweise können sich nur Universitäten oder grosse Forschungsinstitute teure Elektronenmikroskope leisten. Als grosse Ausnahme besitzt unsere Schule sowohl ein Raster-Elektronenmikroskop (REM) als auch ein Transmissions-Elektronenmikroskop (TEM). Dies liegt daran, dass wir von der ETH Zürich und vom Max-Planck-Institut Tübingen ausgediente Geräte übernehmen konnten – und zwar gratis! Obwohl nicht mehr auf dem neuesten Stand der Technik, funktionierten beide Mikroskope noch einwandfrei und konnten deshalb noch gut für Lehre und Forschung an der Schule eingesetzt werden. In den letzten 25 Jahren entstanden so über 20 000 Aufnahmen (zumeist von biologischem Material), welche v. a. als Bilddatenbank, aber auch für Originalarbeiten in Fachzeitschriften genutzt werden. Wie breit gefächert der Anwendungsbereich vor allem des REMs für die Schule ist, soll hier anhand vieler botanischer, zoologischer und selbst fossiler Objekte erläutert und illustriert werden.

1. Einleitung

Elektronenmikroskope sind technisch aufwändige und entsprechend teure Geräte, die man normalerweise nur an Universitäten oder in der Industrie antrifft, aber praktisch nie an öffentlichen Schulen. Wie kommt es nun, dass die Neue Kantonsschule Aarau (NKSA) gleich zwei solcher *Hightech*-Instrumente besitzt? Im Jahr 1990

Abb. 1: Das erste REM (*Stereoscan*, Cambridge Sci. Instr., 1967) gelangte 1990 von der ETH Zürich an die NKSA, nachdem es über 20 Jahre an der ETH im Einsatz war. Obwohl dort offiziell ausgemustert, hat es an der NKSA weitere 17 Jahre gute Dienste geleistet.



hatte der Physiklehrer Peter Kaufmann erfahren, dass an seinem früheren Arbeitsplatz an der ETH Zürich (Prof. H. U. Nissen) ein Raster-Elektronenmikroskop (REM) der ersten Generation (*Cambridge Scientific Instr.*, 1965) durch ein neueres Gerät ersetzt werden sollte. Da für das «alte», aber voll funktionstüchtige REM kein weiterer Einsatz geplant war, hat Peter Kaufmann vorsichtig nachgefragt, ob die NKSA evtl. dieses Gerät bekommen könnte. Es hat dann mehrere Monate bürokratischer Abklärung gebraucht, bis von der ETH offiziell grünes Licht gegeben wurde – die NKSA musste lediglich die Transportkosten für das komplett zerlegte Instrument übernehmen. Es war ein ausgesprochener Glücksfall, dass Peter Kaufmann das Gerät von früher her kannte und er auch über das technische *Know-how* verfügte, um die vielen Einzelteile wieder korrekt zusammensetzen. In den Osterferien 1990 hat er sich im Keller der NKSA diesem Puzzle gestellt und tatsächlich konnte er nach 2 Wochen das REM erstmals einschalten und ein Bild erzeugen. Etwa zu dieser Zeit war auch der Biologe Rainer Foelix neu an die NKSA gekommen und war sofort an diesem Gerät interessiert, hatte er doch zuvor 20 Jahre lang an der Universität mit Elektronenmikroskopen gearbeitet (Abb. 1). So ergab sich rasch die ideale Kombination von technischer Wartung und Betreuung des REMs durch Peter Kaufmann und der praktischen Anwendung (vor allem für biologische Fragestellungen) durch Rainer Foelix (Abb. 2).

Dieses alte REM hat bis 2007 gute Dienste geleistet – 17 Jahre über das offizielle «Ablaufdatum» der ETH hinaus. Allerdings waren in der Zwischenzeit – ähnlich wie in der Fotografie – digitale Geräte auf den Markt gekommen, welche die Bildentstehung und -bearbeitung stark vereinfachten. Als uns Ende 2007 ein neueres, digitales REM (Zeiss DSM 950) von der Fachhochschule Winterthur als Ersatz angeboten wurde, haben wir uns (schweren Herzens) von dem alten, analogen REM getrennt.

Auch hier musste für das Gerät selbst nichts bezahlt werden, lediglich für Transport und Aufbau musste die NKSA resp. zur Hälfte die Fachschaft Biologie aufkommen. Seit 2008 ist nun das bessere und einfacher zu bedienende Zeiss-REM im Einsatz (Abb. 3). Musste man früher über eine Stunde warten, bis die Pumpen das nötige Hochvakuum erreicht hatten, dauert dies heute gerade einmal 5 Minuten; vor allem aber sind die digitalen Bilder genauso einfach zu handhaben wie bei einer normalen Digitalkamera und die frühere mühselige Dunkelkammerarbeit entfällt völlig. Schliesslich muss hier noch kurz das TEM (Zeiss EM9-S2) vorgestellt werden, das wir 2001 durch Prof. W. Ribi vom Max-Planck-Institut Tübingen übernehmen konnten, weil dort das Institut für Kybernetik aufgelöst wurde. Ein TEM ist wesentlich heikler in der praktischen Anwendung, weil hierzu extrem dünne Schnitte hergestellt werden müssen. Glücklicherweise bekamen wir ein Ultra-Mikrotom (Reichert) und etliche Zusatzgeräte dazu geschenkt, so dass auch die klassische Transmissions-Elektronenmikroskopie vollumfänglich durchgeführt werden kann. Allerdings nimmt sie eine deutlich geringere Rolle an der Schule ein, da sie eher forschungsorientiert ist und sich nur bedingt für Demonstrationen eignet.

1.1 Einsatzmöglichkeiten

1.1.1 Im Schulbetrieb

Natürlich ist ein Elektronenmikroskop (EM) in erster Linie ein Forschungsgerät, an dem jeweils nur 1–2 Personen arbeiten können. Trotzdem kann es auch gut für Demonstrationszwecke eingesetzt werden, wie etwa in den Halbklassenpraktika der

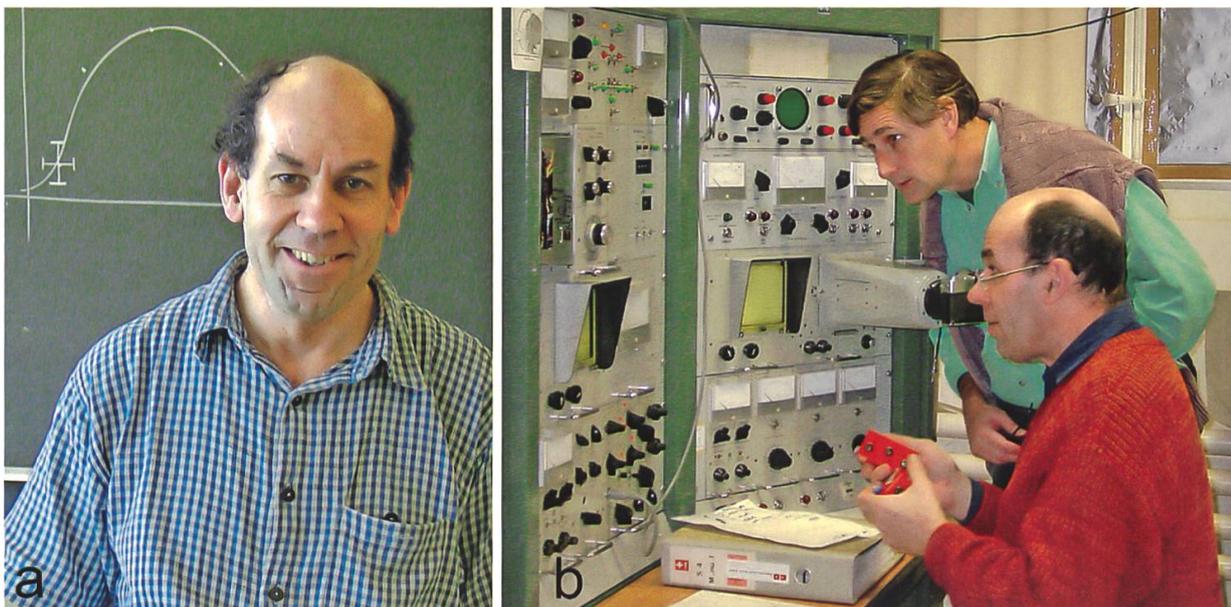


Abb. 2: a) Der Physiklehrer Peter Kaufmann hatte den Transfer des REMs aus seinem alten Institut (Festkörper-Physik) in die Wege geleitet. b) Er hat auch die gesamte technische Betreuung des Gerätes übernommen – hier bei einer Revision zusammen mit seinem Biologie-Kollegen Rainer Foelix im Sommer 2002. Fotos: A. Mastrocola.



Abb. 3: Im Jahr 2007 wurde der NKSA ein neues REM (Zeiss DSM-950) angeboten, mit dem bereits digitale Aufnahmen gemacht werden konnten. Anfang 2008 wurde das fast 40 Jahre alte *Stereoscan*-REM durch das digitale *Zeiss*-REM ersetzt. Kurz nach der ersten Inbetriebnahme konnte es bereits für den Unterricht eingesetzt werden.

1. Abteilungen, Schwerpunkt-, Ergänzungs- oder naturwissenschaftlichen Freifächern. Ein wesentlicher Vorzug des REMs besteht u. a. darin, dass die erzeugten Bilder wegen ihrer grossen Tiefenschärfe räumlich wirken – ganz im Gegensatz zum Lichtmikroskop (LM), das nur in einer Ebene scharf abbildet. Dadurch erscheinen etwa Pflanzenzellen im REM nicht einfach als flächiges Netzwerk, sondern fast dreidimensional (s. Abb. 28). Und während man im LM höchstens 1000-fach vergrössern kann, erlaubt ein REM scharfe Abbildungen bis in den Nanobereich, also 10–100 × mehr.

Die Bedienung des REMs lässt sich relativ rasch erlernen und entsprechend haben mehrere Schüler/innen im Rahmen von Diplom- oder Jahresarbeiten selbständig an diesem Gerät gearbeitet. So haben etwa Yaël Schmuziger und Sophie Welsche in ihrer Maturarbeit (2010) die mikrobielle Zersetzung (verschiedene Bakterien) erfolgreich mit dem REM dokumentiert, und Juan Sebastian Ramirez (Maturarbeit 2012) konnte den chemischen Abbau von PET-Flaschen (speziell von Polyethylen-Terephthalat) sowohl chemisch als auch elektronenoptisch genauer verfolgen. Auch für Diplomarbeiten wurde das REM für Planktonuntersuchungen (z. B. vom Hallwilersee) ergänzend zum LM eingesetzt (s. Abb. 9b). Studierende der Aargauischen Maturi-

tätsschule für Erwachsene (AME) haben ebenfalls die Möglichkeit, mit dem REM zu arbeiten; dies wurde z. B. zur Analyse des Stachelapparates von Bienen und Wespen genutzt (s. Abb. 23) oder auch für einen Pollenatlas (s. Abb. 31).

1.1.2 In der Forschung

Im Laufe von 25 Jahren wurden die EMs der NKSA für verschiedenartige Forschungsprojekte eingesetzt. Im einfachsten Fall handelte es sich um eng umgrenzte Aufgaben, etwa die Planktonproben von den jährlichen meeresbiologischen Exkursionen nach Elba zu untersuchen (Abb. 5–9). Die fotografische «Ausbeute» diente dann dazu, die aus dem Kurs bereits vorhandenen Protokolle und Zeichnungen zu ergänzen. Ähnliches gilt auch für die Bodenfauna im Gebiet des Aletschgletschers (s. Abb. 16).

Häufiger wurden aber auch umfangreichere Projekte mit spezifischen Fragestellungen über längere Zeit verfolgt und zumeist werden die Ergebnisse dann auch in Fachzeitschriften publiziert (siehe Literaturliste S. 47). Oft sind dies lokale Zeitschriften (wie *Bulletin* oder *Fokus* der ANG) oder kleinere nationale Journale (wie *Arachne*, *Mikrokosmos*, *Revue Suisse de Zoologie*, *Schweizerische Bienenzeitung*, *Schweizer Strahler*), in einigen Fällen aber auch international renommierte Zeitschriften (wie *J. of Arachnology*, *J. of Experimental Biology*, *Arthropod Structure & Development*).

1.1.3 Für Vorträge

Im Laufe der Jahre hatte es sich natürlich herumgesprochen, dass an der NKSA aktiv mit Elektronenmikroskopen gearbeitet wird, und entsprechend kommen immer wieder Anfragen für Vorträge, z. B. von naturkundlichen Vereinen, Naturmuseen oder biologischen Instituten. Regelmässige Einladungen kommen etwa von der Mikroskopischen Gesellschaft Zürich, der Entomologischen Gesellschaft Zürich sowie von diversen Naturforschenden Gesellschaften in der ganzen Schweiz und dem benachbarten Ausland. Seltener sind es auch internationale Kongresse, vor allem auf dem Gebiet der Spinnenkunde (Arachnologie), wo Forschungsergebnisse von der NKSA in Form von Vorträgen, Postern oder Abstracts vorgestellt werden.

1.1.4 Für Publikationen

Wie unter 1.1.2 bereits erwähnt, verschwinden die meisten unserer REM-Studien nicht einfach in einer Schublade, sondern werden je nach Relevanz in verschiedenen Zeitschriften veröffentlicht. Insgesamt sind mittlerweile ca. 50 *Publikationen* zusammengelassen – einige wichtigere Beiträge werden im folgenden Text näher erläutert (für Details siehe auch Literaturliste). Oft sind es auch die Autoren oder Verlage bekannter Lehrbücher, die wegen bestimmter REM-Bilder bei uns nachfragen (etwa Wehner & Gehring, *Zoologie*, Thieme Verlag Stuttgart, oder Brusca & Brusca, *Invertebrates*, Sinauer Associates Inc., Massachusetts). In eigener Sache soll hier noch erwähnt werden, dass die letzten beiden deutschen und englischen Auflagen von *Biologie der Spinnen* (Thieme; Chimaira-Verlag) bzw. *Biology of Spiders* (Oxford Univ. Press) weitgehend durch hauseigene REM-Aufnahmen illustriert wurden.

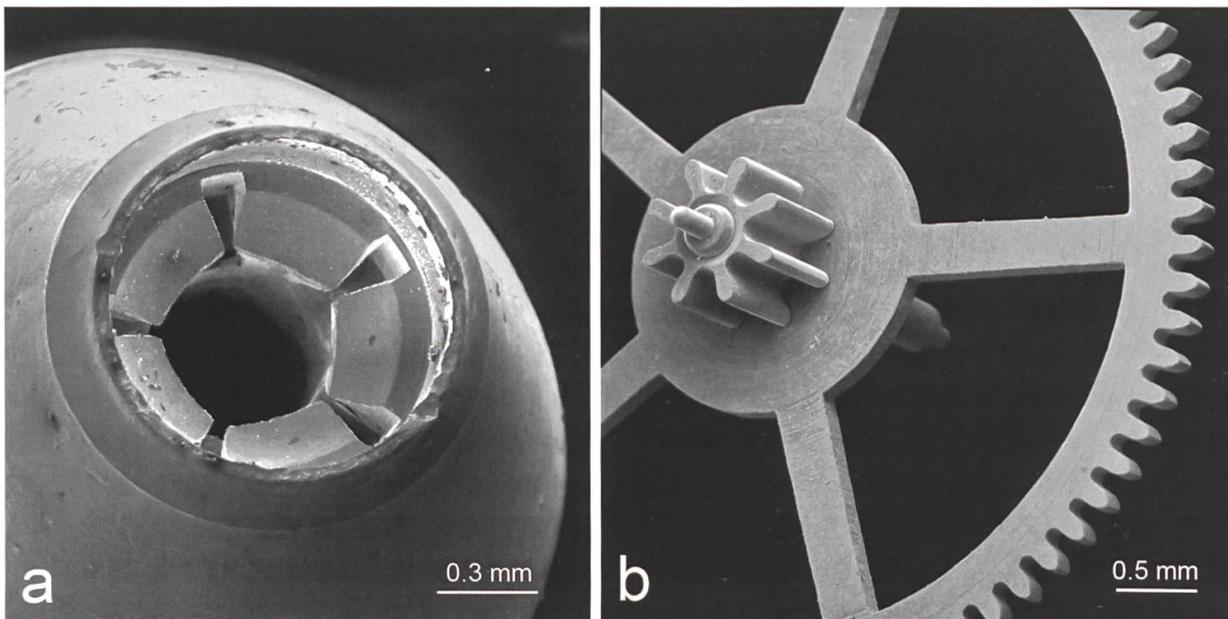


Abb. 4: Technische Objekte aus Metall eignen sich besonders für eine Untersuchung im REM, weil sie nicht mit Gold bedampft werden müssen. a) Spitze eines Kugelschreibers, bei der die Schreibkugel entfernt wurde, um die zuführenden Tintenkanäle zu zeigen. b) Zahnradchen aus einer Armbanduhr, welches die Präzision in der mechanischen Fertigung deutlich macht.

1.1.5 Zusammenarbeit

Über die Jahre hinweg hat sich eine vielfältige Zusammenarbeit mit Universitäten, Museen und Forschungsinstituten ergeben. Die wichtigsten sind: Univ. Zürich (Prof. R. Wehner), Univ. Canberra (Prof. W. Ribí), Univ. Costa Rica (Prof. W. Eberhard), Ben-Gurion Univ. (Prof. Y. Lubin), Naturhistorisches Museum Bern (Dr. C. Kropf), Naturhistorisches Museum Genf (Dr. P. Schwendinger), Naturhistorisches Museum Basel (Dr. A. Hänggi), Senckenberg Museum Frankfurt (Dr. P. Jäger), Denver Museum of Nature & Science (Dr. P. Cushing), Smithsonian National Museum of Natural History, Washington DC (Dr. J. Coddington).

1.2 Einige technische Bemerkungen zum REM

Obwohl das erste REM bereits 1937 von Manfred von Ardenne erfunden und 1938 von Siemens in Berlin gebaut wurde, kamen kommerziell erhältliche REM-Geräte erst um 1965 (Cambridge Scientific Instr.) auf den Markt. Unser erstes REM stammte noch aus dieser Generation (Stereoscan Mark II) und war aus heutiger Sicht relativ einfach aufgebaut. Dies hatte allerdings auch den Vorteil, dass die meisten technischen Fehler mit einfachen Mitteln behoben werden konnten – oder wie Peter Kaufmann es bildhaft ausdrückte: «mit Schraubenzieher und LötKolben».

Auf die Theorie der Bildentstehung im REM kann hier nicht eingegangen werden, aber einige Anmerkungen zur Auswahl und Vorbereitung der zu untersuchenden Proben sind zum besseren Verständnis der vorliegenden Bilder sicher hilfreich. In jedem EM muss durch spezielle Pumpen zuerst ein Hochvakuum erzeugt werden, weil sich ein Elektronenstrahl nur im Vakuum geradlinig ausbreiten kann. In der

Praxis bedeutet dies, dass nur absolut trockene (wasserfreie) Präparate im REM untersucht werden können – damit sind natürlich alle lebenden Zellen und Gewebe ausgeschlossen. Für das REM sind deshalb anorganische oder metallische Objekte am besten geeignet, auch weil sie praktisch keine Vorbehandlung brauchen (Abb. 4). Dagegen müssen fast alle biologischen Objekte vorsichtig entwässert werden (auch um Schrumpfungen zu reduzieren). Danach müssen sie noch mit einer dünnen Metallschicht (Gold oder andere Edelmetalle) bedampft werden, um sie elektrisch leitfähig zu machen. Diese Beschichtung erfolgt heutzutage mit kleinen Sputteranlagen, welche die Objektoberflächen gleichmässig mit einer hauchdünnen Goldschicht überziehen. Die Befürchtung, dass dies ein recht kostspieliger Vorgang sein müsse, trifft Gott sei Dank nicht zu, denn es handelt sich nur um einige Nanometer Gold. Ohne diese Beschichtung kommt es zu elektrischen Aufladungen (bzw. Entladungen) der Objekte, die sich bei der Bilderzeugung dann als «Blitze» störend bemerkbar machen.

Noch ein letzter Hinweis: EM-Bilder sind eigentlich immer schwarz-weiss, weil ja nur Kontrastunterschiede der von den Objekten reflektierten Elektronen registriert werden. Wenn man zuweilen trotzdem «farbige» EM-Bilder sieht, so sind die Farben jeweils künstlich eingefügt (z. B. mit Photoshop). Aus didaktischen Gründen kann eine solche Einfärbung durchaus sinnvoll sein (s. Abb. 24), wenn aber Fliegen willkürlich mit blauen Augen, grünen Rüsseln und roten Fühlern ausgestattet werden, ist dies wissenschaftlich gesehen natürlich dubios.

2. Ausgewählte Beispiele

Aus der Vielzahl der Objekte, die in den letzten 25 Jahren an der NKSA mit dem REM gewissermassen «unter die Lupe» genommen worden sind, sollen im Folgenden einige vorgestellt werden, entweder solche, die sich im schulischen Bereich als besonders geeignet erwiesen haben, oder solche, die biologisch aussergewöhnlich sind, und auch solche, die einen Beitrag zur aktuellen Forschung geliefert haben.

2.1 Einzeller: Kammerlinge (Foraminiferen)

Foraminiferen sind kleine (<1 mm) gehäusetragende Einzeller, man könnte auch sagen «beschaltete Amöben», die vor allem im Meer leben. Mit dem Planktonnetz konnten wir sie z. B. in Elba relativ leicht einfangen und anschliessend im Institut lebend unter dem Lichtmikroskop studieren. Nach dem Absterben sinken die winzigen Kalkgehäuse auf den Meeresgrund und bleiben relativ lange erhalten. Nimmt man z. B. Sandproben vom Strand mit, so kann man zuhause unter einer starken Lupe die meist reinweissen Foraminiferen-Schalen leicht zwischen den gelblichen Sandkörnern entdecken. Im Biopraktikum können die Schüler/innen unter der Binokularlupe die verschiedenen Gehäuse herauspicken und dann im LM genauer anschauen (Abb. 5). Dabei fallen die meist spiralig angeordneten Kammern auf

(daher der Name *Kammerlinge*) und bei stärkerer Vergrösserung auch viele kleine Wandporen, durch die dünne Plasmafäden austreten können (daher der Name *Fora-mini-fera*, eig. «Klein-Loch-Träger»). Gut erhaltene Exemplare kann man aussondern für eine spätere Untersuchung im REM – wo dann besonders die Vielfalt der Formen beeindruckt (über 10 000 verschiedene Arten).

Obwohl die meisten Foraminiferen so klein sind, dass man sie mit blossem Auge eben noch erkennen kann, gab es eine Ausnahme: Im Eozän (vor 40–50 Mio. Jahren) traten Grossformen von mehreren cm Durchmesser auf, die als *Nummuliten* («Münzsteine») bezeichnet werden. Solche Nummulitensteine finden wir in unseren Alpen, aber auch als Geschiebe im Mittelland (Kiesgruben). Da wir mehrere Nummulitensteine in unserer Biosammlung besitzen, können wir im Praktikum natürlich auch solche fossilen Grossforaminiferen direkt vorstellen. Eine «interes-

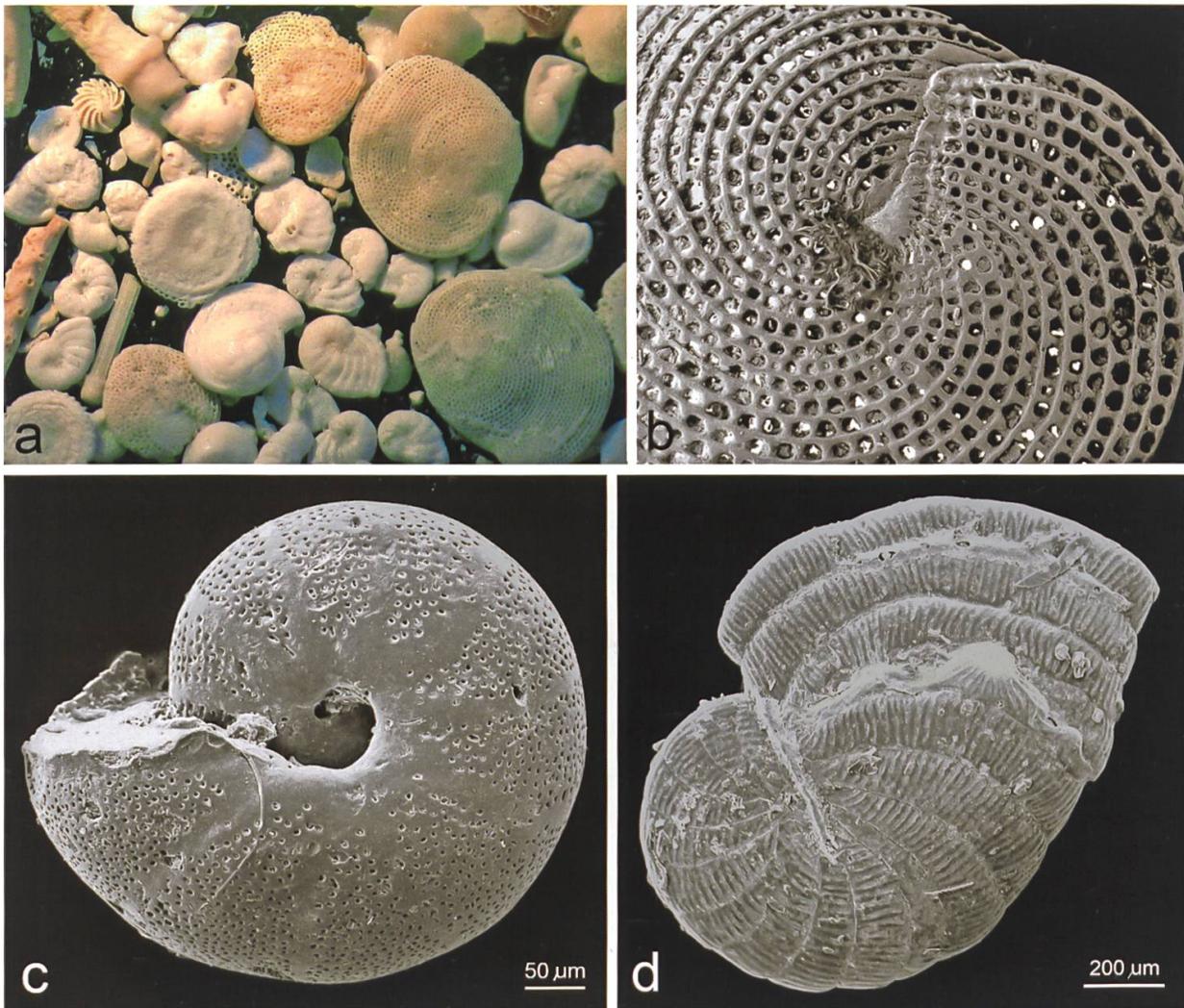


Abb. 5: Foraminiferen sind beschaltete Einzeller (Amöben) mit winzigen ammonitenartigen Kalkgehäusen. a) Eine Sandprobe vom Mittelmeer, aus der unter der Binokularlupe diverse Foraminiferen ausgelesen wurden. b) Detail der Schale einer grossen Foraminifere im REM. c) Eine mehr kugelige Art mit winzigen Poren in der Kalkschale. d) Eine posthornförmige Art, mit angedeuteten radialen Kammerwänden und feinen Längsrillen.

sante Kleinigkeit»: Die Pyramiden von Gizeh bestehen vollständig aus Nummuliten-gestein, d. h. aus Foraminiferen-Schalen.

2.2 Einzeller: Strahlentierchen (Radiolarien)

Bei den Strahlentierchen handelt es sich ebenfalls um marine, beschaltete Einzeller, deren komplexe Skelette aber glasartig sind (Kieselsäure, $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Obwohl die ersten Radiolarien schon um 1830 beschrieben wurden, stritten sich die Experten jahrzehntelang, ob es wirklich Einzeller seien. Der wohl bekannteste Radiolarien-forscher war Ernst Haeckel, der auch für seine künstlerische Ader bekannt war und dessen 10-bändiges Werk «*Kunstformen der Natur*» (1904) die Radiolarien auch ausserhalb der Zoologengilde populär machte.

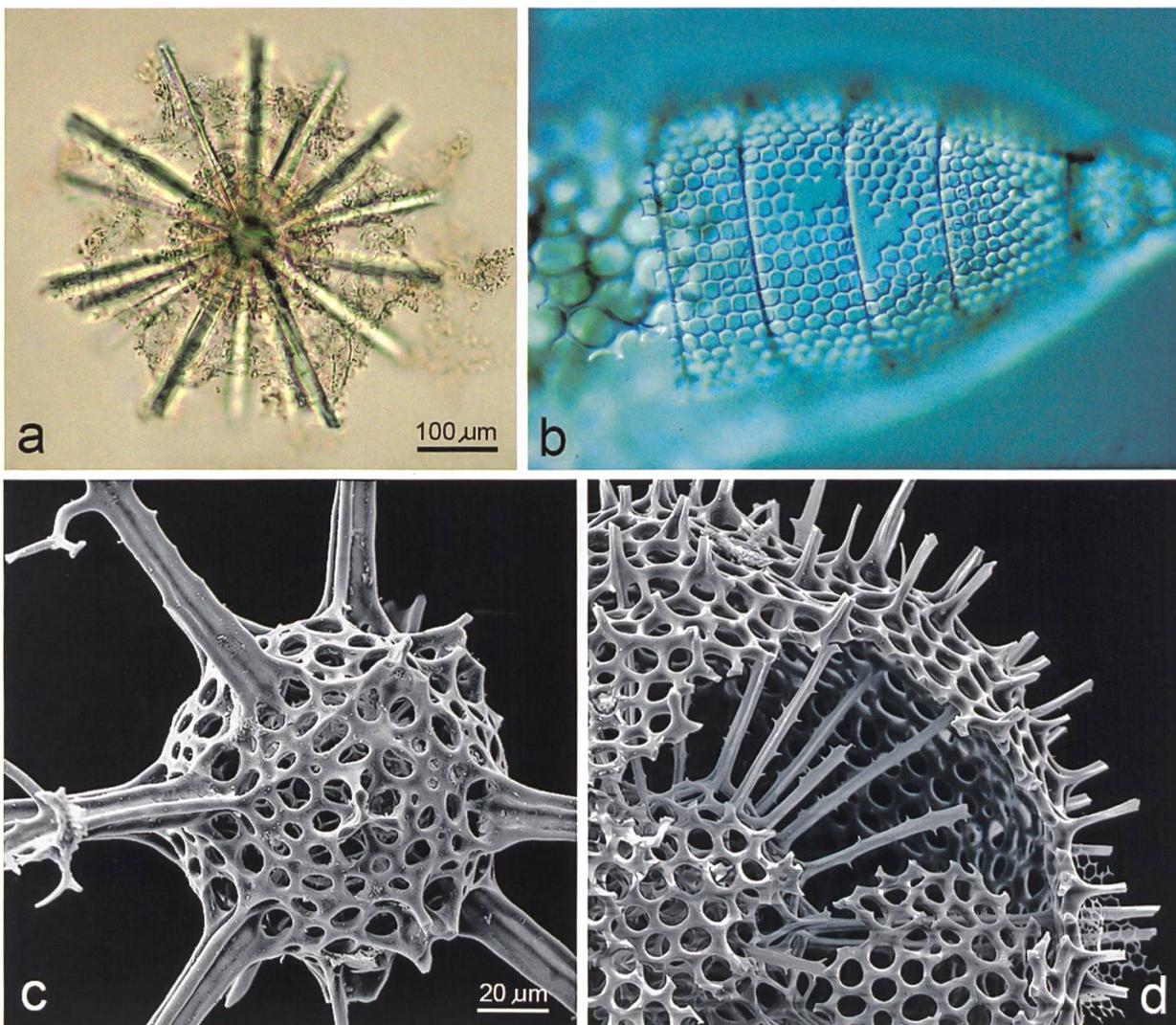


Abb. 6: Strahlentierchen (*Radiolarien*) sind marine Einzeller, deren komplexes Skelett Kieselsäure (SiO_2) und organische Bestandteile enthält. a) Frisch fixierte Radiolarie vom meeresbiologischen Kurs in Elba. b) Radiolarien-Skelett im Phasenkontrast-Mikroskop. c, d) Radiolarien-Skelette im REM zeigen schön den schalenartigen Aufbau. In d) ist das äussere Schalengitter aufgebrochen und zeigt die Zentralkapsel mit radial ausstrahlenden dünnen Streben.

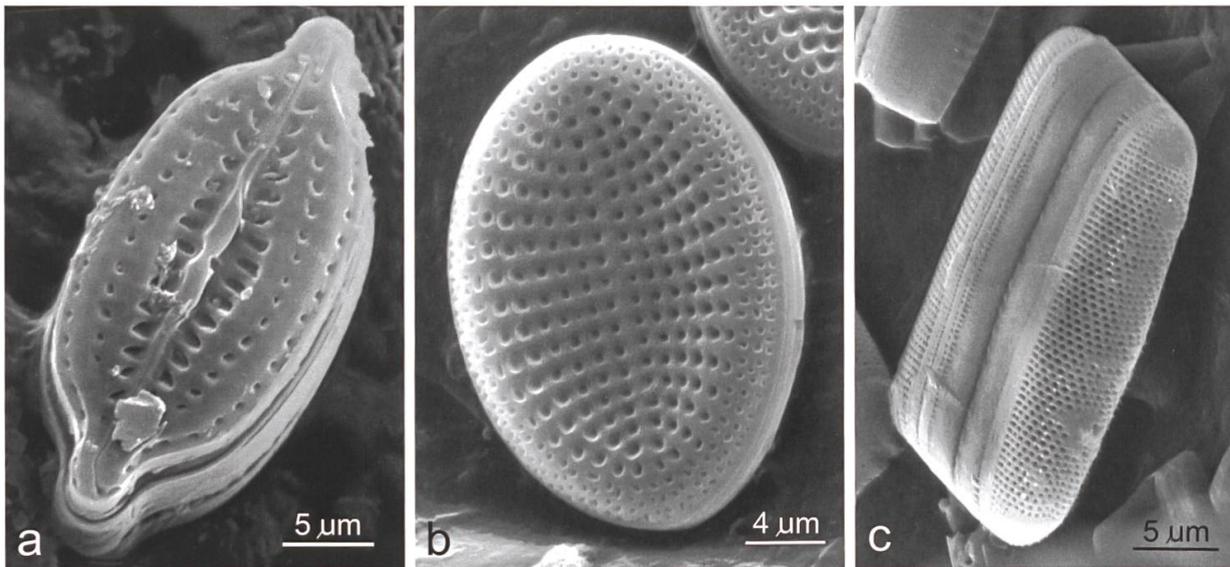


Abb. 7: Kieselalgen besitzen eine zweiteilige Schale aus Kieselsäure, die von winzigen Poren durchbrochen wird. a) Eine kahnförmige Kieselalge aus dem Mittelmeer (Elba). b, c) Zwei Kieselalgen aus dem Nordatlantik (Neuschottland).

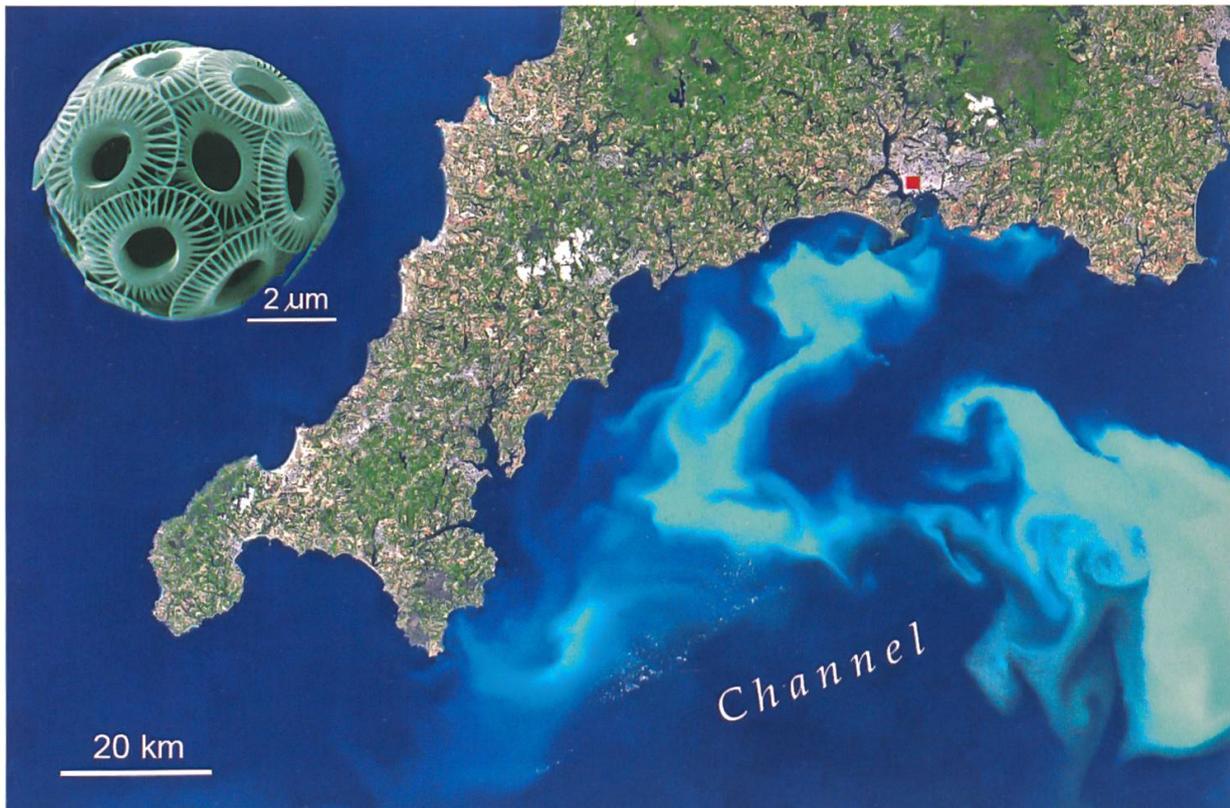


Abb. 8: *Emiliana huxleyi* (Inset) ist die häufigste marine Kalkalge. Die kugelige Einzelzelle wird von einem Dutzend filigraner Scheibchen (*Coccolithen*) bedeckt (aus Foelix & Kaufmann 1995). Tritt diese Art in Massen auf, kommt es zu einer grossflächigen Algenblüte, wie die grünen Wolken im Satellitenbild des Ärmelkanals deutlich zeigen (Landsat 24.7.1999). Der rote Punkt markiert die Stadt Plymouth, an der Grenze von Cornwall und Devon.

Wir konnten lebende Radiolarien in Elba aus Planktonfängen im LM bestaunen und haben auch alkoholfixiertes Material mit nach Aarau genommen. Dort wurden die Proben gereinigt, auf Deckgläschen getrocknet und die Skelette dann im REM genauer inspiziert. Bei den meist kugeligen Gehäusen ist typisch, dass eine innere Gitterkugel von radialen Streben durchbrochen wird, die dann noch von einer äusseren Kugelschale umschlossen wird (Abb. 6). Dieser komplexe filigrane Aufbau ist besonders gut zu erkennen, wenn ein Stück der äusseren Gitterkugel herausgebrochen ist (Abb. 6d).

Da die Radiolarien-Skelette v. a. aus Kieselsäure bestehen, sind sie extrem haltbar und entsprechend auch fossil gut erhalten. Die bekanntesten fossilen Radiolarien stammen aus dem Eozän (ca. 50 Mio. Jahre) der Antilleninsel Barbados, wo die Anhäufung der vielen Radiolarien sogar zu Gesteinsbildung geführt hat.

2.3 Einzeller: Schalenträgende Algen

2.3.1 Kieselalgen (Diatomeen)

Kieselalgen sind weit verbreitete einzellige Algen, sowohl im Süsswasser als auch in den Meeren – und sogar an Land kommen sie in feuchter Erde und auf Blättern vor. Wie schon der Name impliziert, besitzen sie eine kieselsäurehaltige Schale, genauer gesagt: In die Zellwand sind Silikate ($\text{SiO}_2 + n\text{H}_2\text{O}$) eingelagert. Dabei ist typisch, dass es sich um eine zweiteilige Schale handelt, wobei jeweils – wie bei einer Schachtel – ein etwas grösserer Deckel über einen kleineren Boden greift (Abb. 7). Jede Schale wird von Hunderten von winzigen Poren durchbrochen, so dass der Stoffaustausch zwischen Zelle und Umgebung gewährleistet ist.

Im Unterricht sind lebende Kieselalgen einfach zu demonstrieren: Sie sind praktisch in jedem Gewässer im Algenbewuchs von Steinen und Pflanzen zu finden – selbst im Aquarium im Schulzimmer. Die fein ziselierte Struktur der Kieselschalen ist im LM gerade noch zu erkennen; erst unter dem REM werden die feinen Porenmuster sichtbar, die von Art zu Art variieren.

Ähnlich wie bei den Radiolarien können die abgelagerten Kieselsäure-Skelette über lange Zeiträume in Gesteine umgewandelt werden, nämlich in sog. *Diatomite*. Wir hatten die Gelegenheit, einen Süsswasser-Diatomiten aus dem Miozän (35 Mio. Jahre) Frankreichs mit unserem REM zu untersuchen, und waren überrascht, dass die Schalen zwar oft zerbrochen waren, aber ansonsten nicht von heutigen Formen zu unterscheiden sind (Foelix *et al.* 1992).

2.3.2 Kalkalgen (Coccolithophorida)

Der Name *Coccolithophorida* ist wohl nur den Algenspezialisten bekannt. So exotisch der Name sein mag, die winzigen einzelligen Meeresalgen spielen eine ganz bedeutende Rolle im Kohlenstoff-Kreislauf bzw. der Fixierung des atmosphärischen Kohlendioxids (CO_2) – in ihrer Gesamtheit sind sie sogar wichtiger als alle tropischen Regenwälder. Das liegt daran, dass sie in riesiger Zahl in den Weltmeeren auftreten: bis zu 300 Mio. Einzelzellkugeln in 1 Liter Meerwasser! Periodisch auftretende Mas-

sensammlungen («Algenblüte») sind auf Satellitenbildern als türkisfarbige Wolken im Ozean gut sichtbar (> 100 km Durchmesser), obwohl jede Zelle nur 5–10 µm misst (Abb. 8).

Wir konnten von einem Spezialisten des Naturhistorischen Museums Basel (Dr. Michael Knappertsbusch) Planktonproben aus dem Mittelmeer bekommen, in denen diese Kalkalgen angereichert waren. Erst unter dem REM wird deren exquisite Feinstruktur sichtbar: Die kugelige Zelle lagert an ihrer Oberfläche etwa ein Dutzend Kalkplättchen ab – oft in Form von Speichenrädchen, deren Ränder miteinander verhakt sind (Abb. 8: Inset). Beim Absterben der Zelle bleiben diese Kalkrädchen (Coccolithen) erhalten, allerdings löst sich der kugelige Verband bald auf und die einzelnen Rädchen sinken auf den Meeresgrund. Sammeln sie sich dort an, so können sie im Laufe der Zeit zu einem Kalkgestein verbacken, nämlich zu Schreibkreide (z. B. auf der Insel Rügen). 1 cm³ Schreibkreide enthält über 800 Mio. Coccolithen – welcher Lehrer ist sich dessen bewusst, wenn er ein Stück Kreide in der Hand hält?

2.3.3 Panzergeissler (Dinoflagellaten)

Panzergeisselalgen können wir praktisch vor unserer Haustür finden – in Planktonproben vom Hallwilersee waren sie immer häufig anzutreffen. Auch hier handelt es sich um einzellige, beschaltete Grünalgen, allerdings besteht die Schale nicht aus Kalk oder Silikat, sondern aus dünnen Zelluloseplatten, die dicht unter der Zellmembran liegen. Typisch sind zudem zwei ausgeprägte Furchen zwischen den Platten, aus denen zwei bewegliche Geisseln (Flagellen) zur Fortbewegung entspringen (Abb. 9b). Manche Arten besitzen lange Fortsätze, so dass die ganze Zelle ankerartig erscheint (z. B. *Ceratium*).

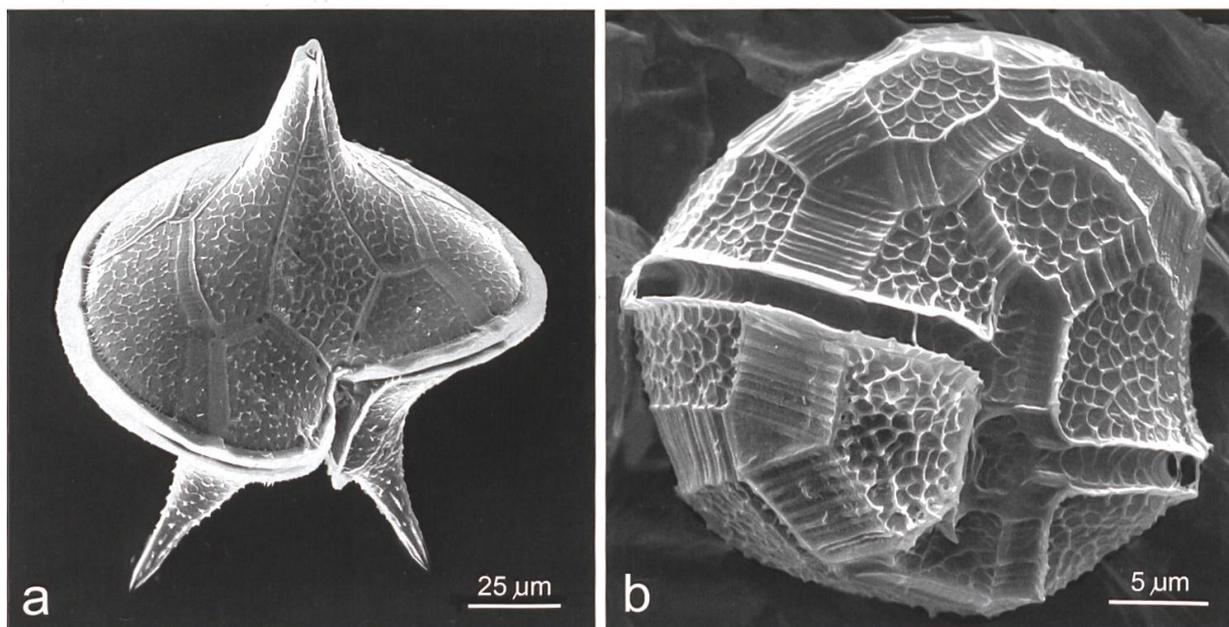


Abb. 9: Panzergeisselalgen (Dinoflagellaten). a) Eine marine Form (*Protopteridinium*) aus Elba, mit kurzen Skelettfortsätzen. b) Eine Süswasserform (*Gonyaulax*) aus dem Hallwilersee mit typischen Furchen; die Skelettplättchen bestehen aus Zellulose.

Dinoflagellaten kommen sowohl im Süsswasser als auch im Meer vor. Auch sie können zuweilen massenhaft auftreten, dabei erscheint die «Algenblüte» aber tiefrot. Einige Arten der Dinoflagellaten (*Noctiluga*, *Pyrodinium*) bewirken übrigens das sog. *Meeresleuchten*, welches auf «Biolumineszenz» beruht: Bei kräftigem Wellenschlag oder auch bei direkter Berührung reagieren diese Zellen mit dem Aussenden blaugrüner Lichtsignale.

3. Ausgewählte Beispiele: Wirbellose

3.1 Stachelhäuter

Stachelhäuter besitzen ein ausgeprägtes Kalkskelett, das sich gut für Untersuchungen mit dem REM eignet. Wir wollen hier nur auf zwei Beispiele eingehen, nämlich auf den Aufbau von Seeigelstacheln und auf die reduzierten Kalkplättchen im Hautmuskelschlauch von Seegurken.

3.1.1 Seeigelstachel

Seeigelstacheln bestehen aus einem filigranen Kalkskelett, das im lebenden Zustand von einer dünnen Zellschicht überzogen wird. Da diese Schicht auch verschiedenste Pigmentzellen enthält, erscheinen die Stacheln im LM entsprechend farbig (Abb. 10a). Im REM ist v. a. die Architektur des Kalkskeletts gut zu erkennen (Abb. 10b). Ausser dem regelmässigen radialen Aufbau fällt auf, dass etwa die Hälfte des Volumens aus Hohlräumen besteht, d. h., die ganze Konstruktion ist ausgesprochen materialsparend. Dies gilt nicht nur für die Stacheln, sondern allgemein für alle

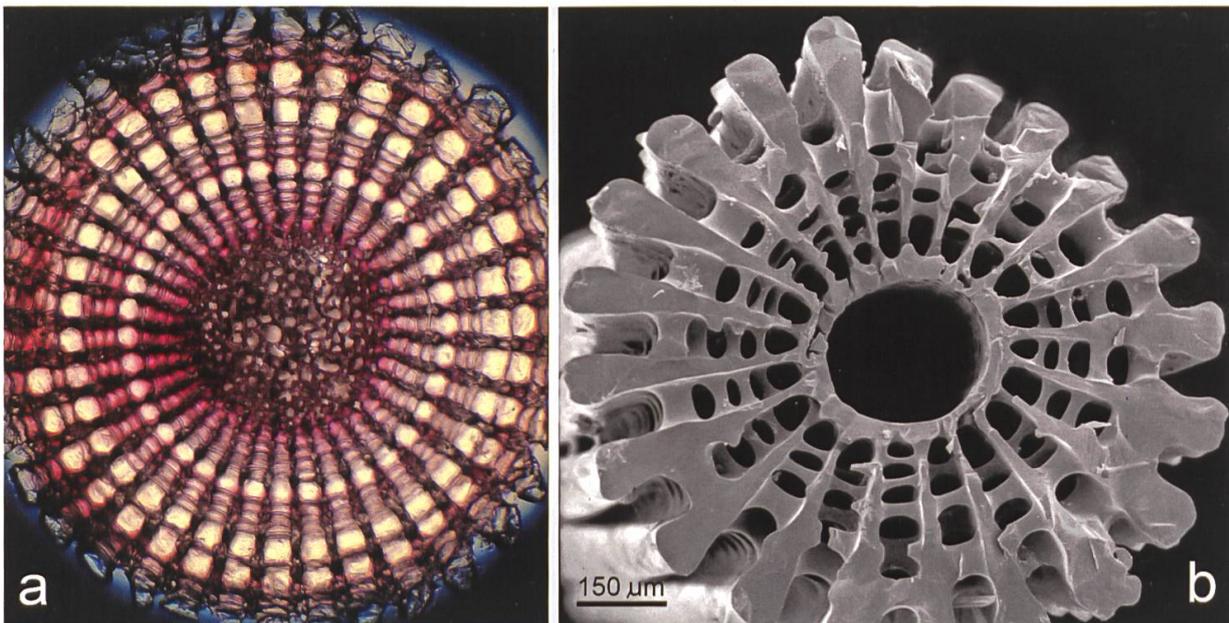


Abb. 10: Seeigel-Stacheln. a) Der Dünnschliff eines Seeigel-Stachels zeigt im LM einen rosettenartigen Aufbau, der von Art zu Art variiert. b) Quergebrosener Stachel im REM. Nur etwa die Hälfte des Volumens wird von fester Substanz (CaCO_3) eingenommen.

Skelettelemente der Stachelhäuter. So lassen sich selbst winzige Kalksplitter aufgrund ihrer typischen Gitterstruktur den Stachelhäutern zuordnen.

3.1.2 Seegurken-Sklerite

Bei den Seegurken ist das Kalkskelett weitgehend reduziert, lediglich mikroskopisch kleine Plättchen oder Nadeln (Sklerite) sind in den Hautmuskelschlauch eingelagert. Je nach Lage im Körper können die Sklerite stäbchenförmig, rädchenförmig oder sternförmig gestaltet sein (Abb. 11a). Nach dem Absterben bleiben von einer Seegurke nur die winzigen Sklerite übrig. Anhand ihrer typischen Form können aber Rückschlüsse auf die ursprüngliche Art gezogen werden.

Der Geologische Arbeitskreis Frick untersucht seit Jahren Schlammproben aus dem Unteren Lias in der Tongrube Frick, vor allem die sog. Mikrofossilien. Der Leiter (Karl Haldimann) hat sich speziell mit Seegurken-Skleriten befasst und uns auch eine Auswahl zur Untersuchung im REM geschickt. Als Beispiel zeigen wir hier einen rädchenförmigen Sklerit (Abb. 11b), der eindeutig von einer Seegurke stammt – und der selbst nach 200 Mio. Jahren noch hervorragend erhalten ist (Haldimann 2011).

3.2 Weichtiere (Muscheln, Schnecken, Tintenfische)

Die meisten Weichtiere besitzen eine Aussenschale, nur ganz wenige dagegen eine Innenschale. Obwohl wir den Aufbau der Aussenschale (Prismenschicht und Perlmutter-schicht) bei Muscheln, Nautilus und sogar von Jura-Ammoniten mit dem REM untersucht haben, wollen wir hier nur kurz auf die «Innenschale», den sog. *Schulp* des

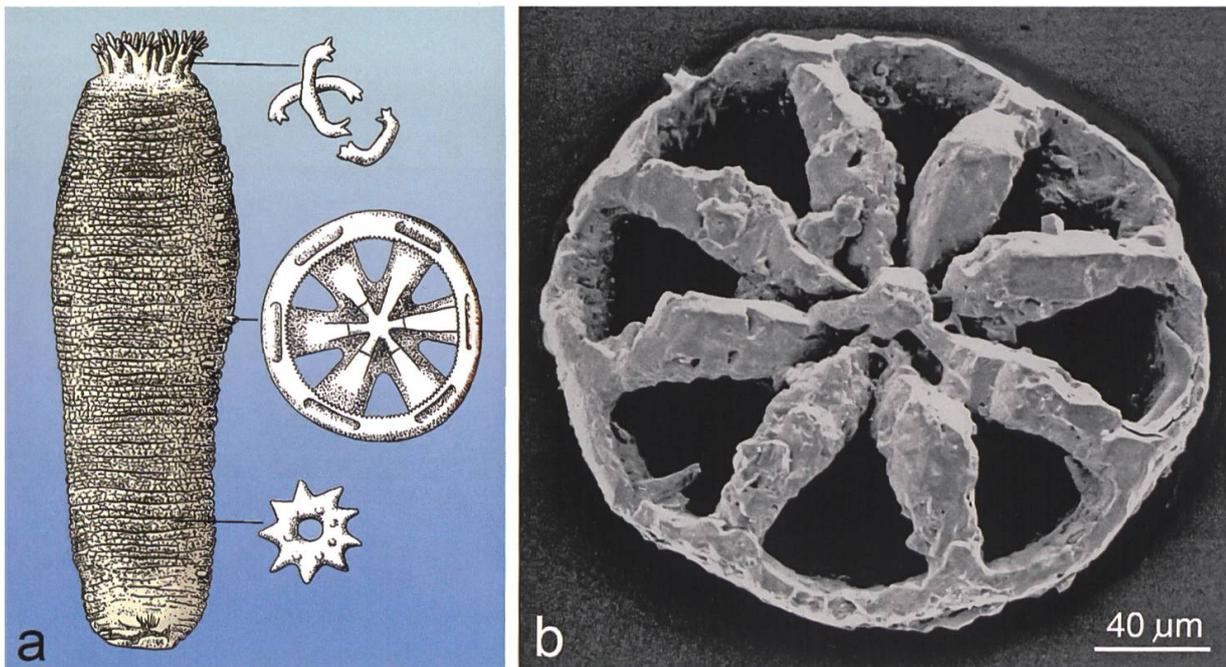


Abb. 11: Seegurken haben kein festes Aussenskelett, sondern nur kleine Kalkplättchen (Sklerite) in der Haut. a) Bestimmte Formen von Kalkplättchen kommen in spezifischen Körperregionen vor. b) Fossile rädchenförmige Sklerite aus der Tongrube Frick zeigen, dass Seegurken schon im unteren Jura weit verbreitet waren (aus Haldimann 2011).

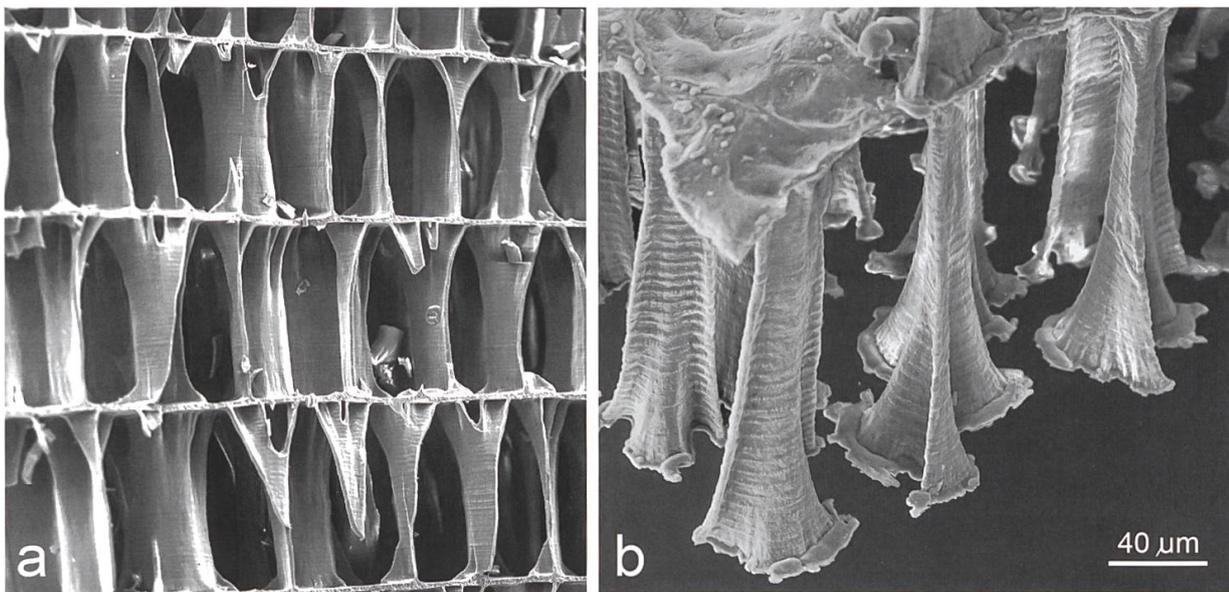


Abb. 12: Tintenfische (*Sepia*) besitzen eine typische Rückenplatte, den sog. *Schulp*. a) Quergebroschener Schulp mit vielen parallelen Kalkschichten, die durch kleine Stützpfiler getrennt sind. b) Genau betrachtet handelt es sich um dünne Stützwände, die mäanderartig verfaltes sind. Die Zwischenräume sind im lebenden Tier mit Gas (Stickstoff) gefüllt.

Tintenfisches *Sepia*, eingehen. Die meisten Leute kennen Tintenfisch-Schulpe entweder vom Strand (wo sie oft angeschwemmt werden) oder aus dem Vogelkäfig (wo sie eine beliebte Kalkquelle für Ziervögel sind). Nur die wenigsten wissen, dass es sich dabei um eine Art Rückenplatte von *Sepia* handelt – auch hier der einzige Körperteil des Tintenfisches, der nach dem Tod übrig bleibt.

Die Feinstruktur des *Sepia*-Schulps ist ziemlich komplex: Viele parallele dünne Lagen aus einer organischen Matrix, die mit Kalk verstärkt ist, liegen übereinander und werden durch Stützstreben auf gleichem Abstand gehalten (Abb. 12a). Besonders bemerkenswert ist die Form dieser Stützstreben: Eigentlich sind es lang ausgezogene Stützwände, die mäanderartig verfaltes sind (Abb. 12b). Die Zwischenräume sind im lebenden Zustand mit Gas (Stickstoff) gefüllt, vermutlich, um einen gewissen Auftrieb zu bewirken. Inwieweit *Sepia* hierdurch das spezifische Gewicht des Körpers einstellen kann, ist allerdings nicht bekannt.

3.3 Spinnentiere

Da sich der Erstautor seit Jahrzehnten mit Spinnentieren wissenschaftlich befasst, ist es naheliegend, dass auch mit dem REM der NKSA relativ viel an verschiedenen Spinnen und Skorpionen geforscht wurde. So war der Beitrag unseres REMs ganz entscheidend für die beiden letzten Auflagen des Lehrbuches *Biologie der Spinnen* (1992, 2015) bzw. die englische Version *Biology of Spiders* (1996, 2011). Wir wollen aber hier nur auf ganz wenige Beispiele aus dem Gebiet der Arachnologie eingehen, einerseits auf einige «interessante Kleinigkeiten», andererseits aber auch auf ein paar grundlegende Erkenntnisse, die in internationalen Fachzeitschriften veröffentlicht wurden.

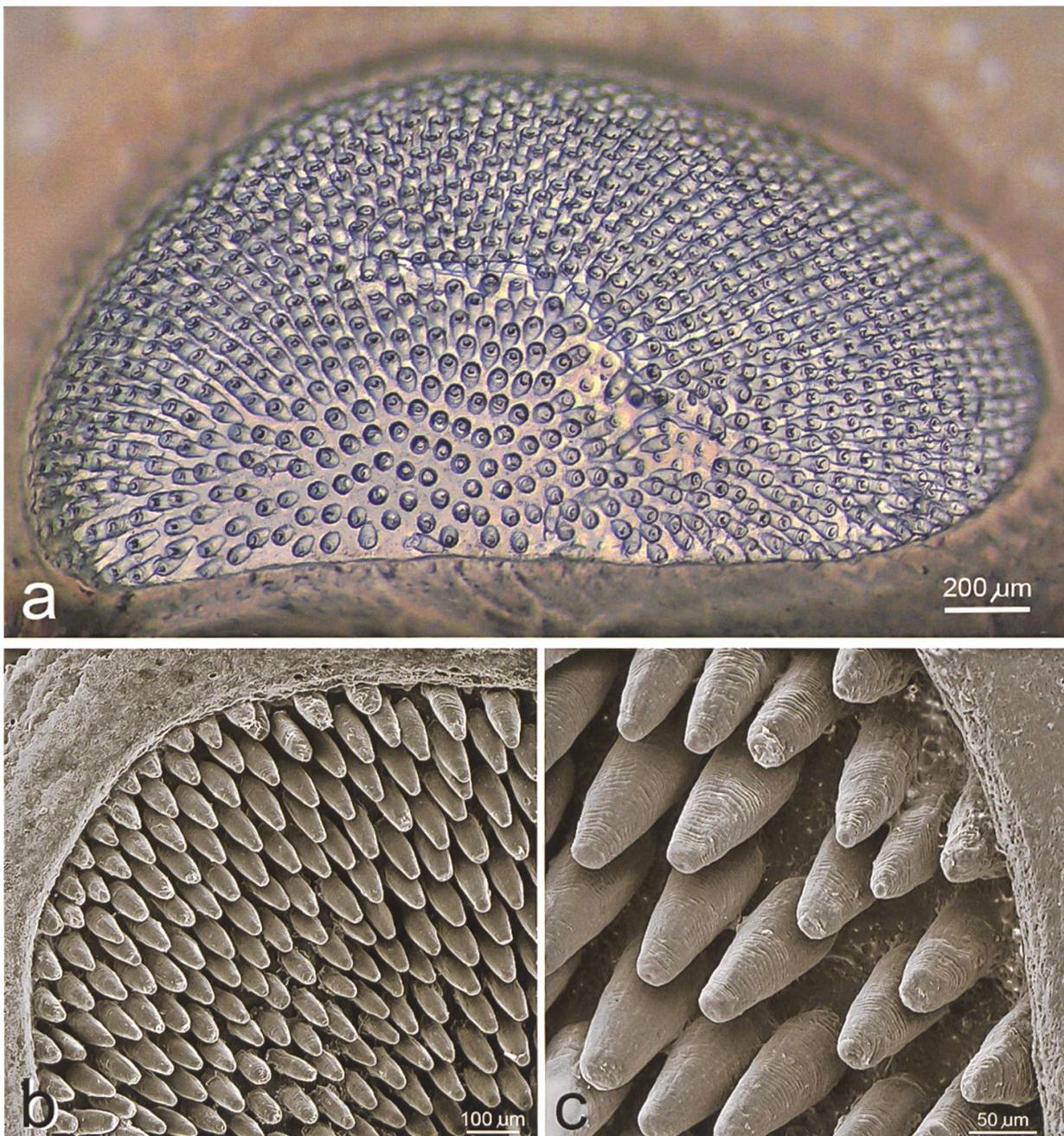


Abb. 13: Der Pfeilschwanzkrebs *Limulus* hat zwei grosse Facettenaugen, ähnlich denen der Insekten. Bei einer Häutung wird das ganze Aussenskelett inklusive der Augen abgeworfen. a) Ausser der oberflächlichen Cornea-Schicht werden auch die Kristallkegel mitgehäutet (Durchlicht-Aufnahme). b, c) Innenansicht eines gehäuteten Auges mit den typischen Linsen der Kristallkegel (REM-Aufnahmen) (aus Foelix & Erb 2014b).

3.3.1 Pfeilschwanzkrebs (*Limulus*)

Trotz des «Krebses» im Namen zählt *Limulus* zu den Spinnenverwandten. Besonders bekannt ist *Limulus*, weil er als sog. «lebendes Fossil» gilt, d. h., es handelt sich um einen sehr ursprünglichen Gliederfüssler, der sich seit Jahrtausenden nicht mehr verändert hat. So sehen versteinerte Pfeilschwanzkrebse aus der Jurazeit (160 Mio. Jahre) fast gleich aus wie die heutigen Formen.

Der normale Lebensraum von *Limulus* sind die Ostküsten Amerikas; sie sind aber auch in einem Brackwasser-Aquarium relativ leicht zu halten – z. B. im Naturama in Aarau. Von dort haben wir einige abgeworfene Häute bekommen, an denen man die anatomischen Besonderheiten genauso gut studieren kann wie am ganzen Tier. Wir wollen hier kurz über die beiden Hauptaugen berichten, die gewöhnlich als typische «Facettenaugen» beschrieben werden, wie sie von Insekten bekannt sind. Das Besondere daran ist, dass die grossen Linsen der 500–1000 Einzelaugen bei jeder Häutung abgeworfen werden (Abb. 13). Bei genauer Untersuchung der alten Haut (Exuvie) sieht man auf der Innenseite der Facettenaugen lange Kristallkegel, die für die Bildentstehung verantwortlich sind. Da sie – in Anlehnung an Kontaktlinsen – gewissermassen «Wegwerf-Linsen» sind, müssen sie bei jeder Häutung neu gebildet werden (Foelix & Erb 2014b).

3.3.2 Spinnen, Skorpione, Zecken

Ein kennzeichnendes Merkmal der **Spinnen** sind ihre Mundwerkzeuge, die sog. *Cheliceren* (Foelix *et al.* 2005). Auf einem massiven Grundglied sitzt jeweils eine bewegliche Klaue, und an deren Ende liegt eine Giftöffnung (Abb. 14a).

Die Cheliceren sind eine raffinierte Kombination einer Stichwaffe (Chelicerenklaue) und einer Injektionsspritze für lähmendes Gift: Beim Biss werden die beiden Chelicerenklauen taschenmesserartig aus einer Furche ausgeklappt und in das Opfer gestossen; gleichzeitig wird aus einer Giftdrüse im Körperinneren das Gift ausgepresst. Interessanterweise liegt die Giftdrüsen-Öffnung nicht am Ende der Klauenspitze, sondern kurz davor. Dadurch ist die empfindliche Spitze mechanisch stabiler und zudem wird die Spitze beim Einstechen nicht durch Gewebe verstopft. Die gleiche, technisch optimale Lösung liegt übrigens auch bei den Giftzähnen von Schlangen vor – und natürlich auch bei unseren Injektionsnadeln (Foelix 2011).

Auch beim Giftstachel der **Skorpione** liegen ähnliche Verhältnisse vor, nur sind dort zwei Giftdrüsen ausgebildet, und entsprechend gibt es auch zwei seitlich gelegene Giftöffnungen. Allerdings sind beide Öffnungen nur schwierig in einem Bild zu zeigen – dies ist nur bei genauer Aufsicht der Spitze möglich (Abb. 14b). Bricht man die äusserste Spitze ab, so sind die beiden Giftgänge aber deutlich zu sehen (Abb. 14c). Wir konnten im Skorpionsstachel auch zahlreiche Sinnesorgane (Mechano- und Chemorezeptoren) nachweisen. Dies bedeutet, dass der Stachel auch Reize aus der Umgebung aufnimmt, so dass er beim Stechen gezielt platziert werden kann (Foelix *et al.* 2014).

Bei den **Zecken** sind die Mundwerkzeuge entsprechend ihren Aufgaben (Anheften, Saugen) etwas modifiziert. Die Cheliceren sind relativ klein und nur seitlich bestachelt, dagegen ist der zentrale «Bohrkopf» (Hypostom) mit vielen Widerhaken besetzt (Abb. 15). Er wird zum Saugen dübelartig in die Haut geschoben und verankert dort den Kopf der Zecke. Wenn man die massiven Widerhaken an Hypostom und Cheliceren betrachtet, wird gut verständlich, weshalb sich einmal eingebohrte Zecken nur schwer aus unserer Haut entfernen lassen.

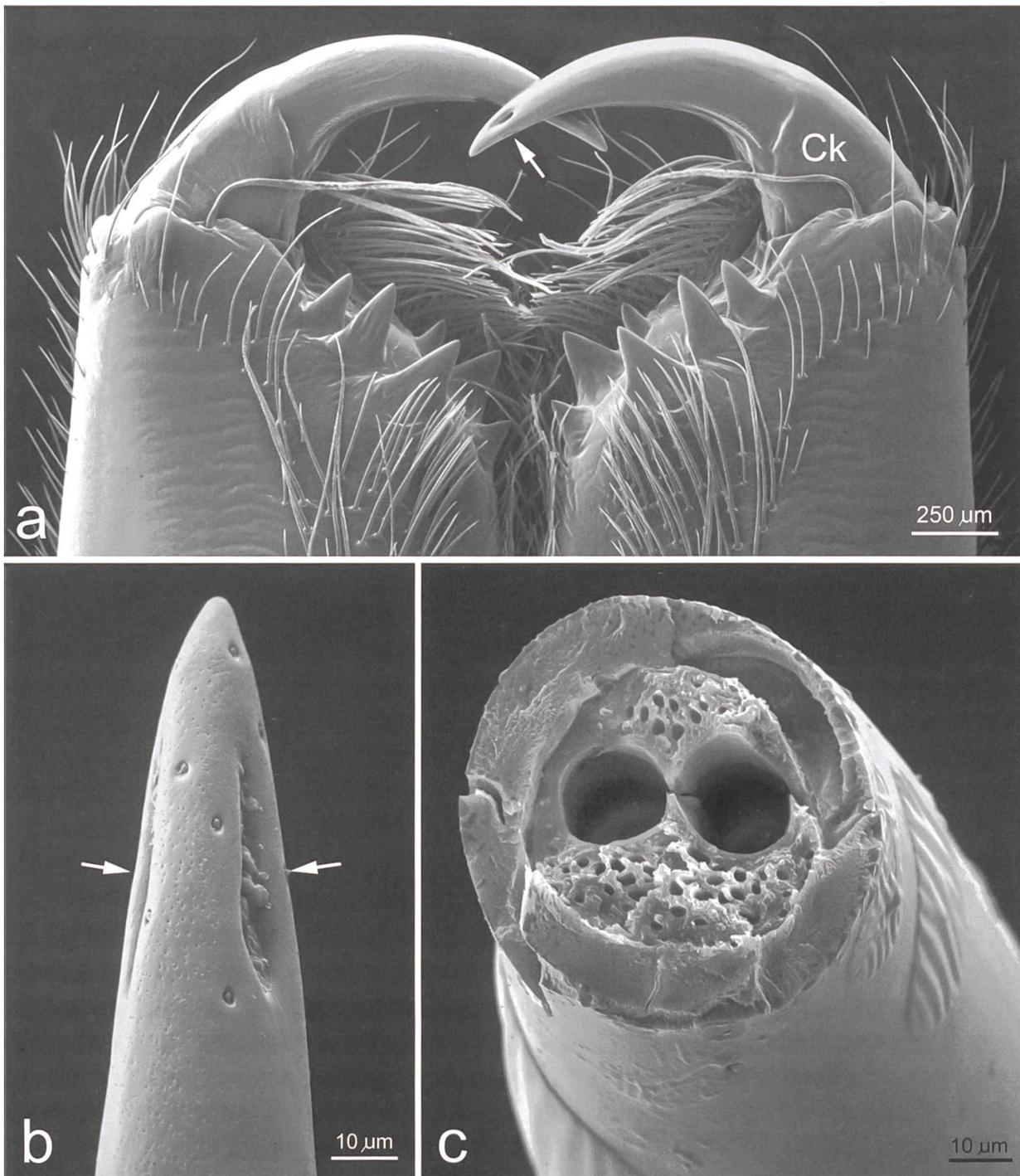


Abb. 14: a) Spinnen haben spezielle Beisswerkzeuge, die sog. *Cheliceren*. Die Giftklauen (Ck) liegen normalerweise eingeklappt zwischen den Zahnreihen; beim Beutefang werden sie ausgeklappt, in das Opfer gestossen und Gift wird aus den Klauenspitzen ausgepresst. b) Beim Schwanzstachel der Skorpione liegen 2 Giftöffnungen (Pfeile) seitlich an der Stachelspitze. c) Schneidet man diese Spitze ab, so treten die Giftkanäle der beiden Giftdrüsen deutlich hervor.

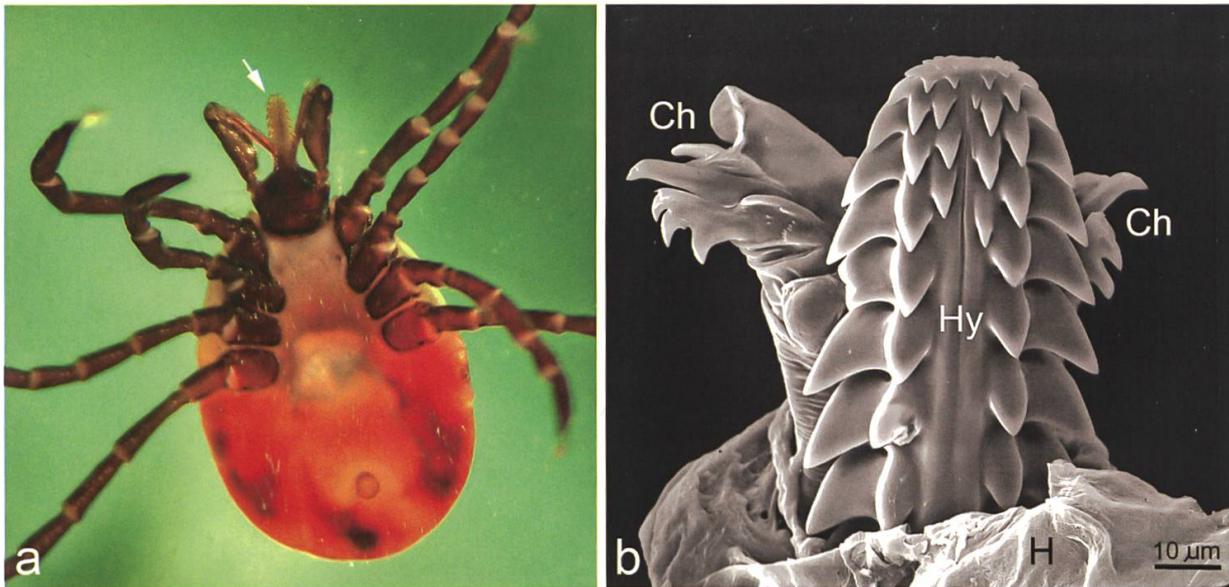


Abb. 15: a) Zecken besitzen bohrende Mundwerkzeuge mit einem zentralen «Bohrkopf» (Hypostom, Pfeil) und seitlichen Cheliceren. b) Unter dem REM werden die massiven Widerhaken an Cheliceren (Ch) und Hypostom (Hy) deutlich, die den Kopf der Zecke (Holzbock, *Ixodes ricinus*) fest in unserer Haut (H) verankern.

3.4 Insekten

Unter den Gliederfüsslern nehmen die Insekten mit fast eine Million verschiedener Arten den weitaus grössten Teil ein. Wir wollen hier nur punktuell einige interessante Beispiele vorstellen, vor allem solche, die sich für eine Untersuchung mit dem REM besonders eignen.

3.4.1 Urinsekten

Die Urinsekten sind eine Reliktgruppe der frühen Insektenevolution; ihr auffälligstes Merkmal ist das Fehlen von Flügeln. Allgemein bekannt sind die sog. Silberfischchen, die wir in unserer Küche finden, evtl. auch die winzigen Springschwänze (Collembolen) im Humus. Wir zeigen hier Bilder von einem sog. «Gletscherfloh», der bei einer Projektwoche im Aletschgletschergebiet auf dem Gletschereis häufig vorkam. Dass es sich um einen «Springschwanz» handelt, ist an der «Sprunggabel» zu erkennen, die am Ende des Hinterleibs gelegen ist (Abb. 16a). Normalerweise ist dieser Fortsatz nach vorne eingeklappt, kann aber zur sprunghaften Fortbewegung rasch nach unten schnellen. Die Augen sind stark reduziert und bestehen nur aus 8 Einzellinsen bzw. Ommatidien (Abb. 16b). Bemerkenswert bei den Collembolen ist weiterhin die Oberflächenstruktur der Körper-Cuticula, die ein ganz feines hexagonales Muster bildet und erst bei sehr hohen Vergrösserungen im REM zum Vorschein kommt (Abb. 16c).

3.4.2 Termiten

Ebenfalls relativ ursprüngliche Insekten sind die Termiten. Sie sind eng mit den Schaben verwandt und nicht – wie oft geglaubt wird – mit den Ameisen. Zwar

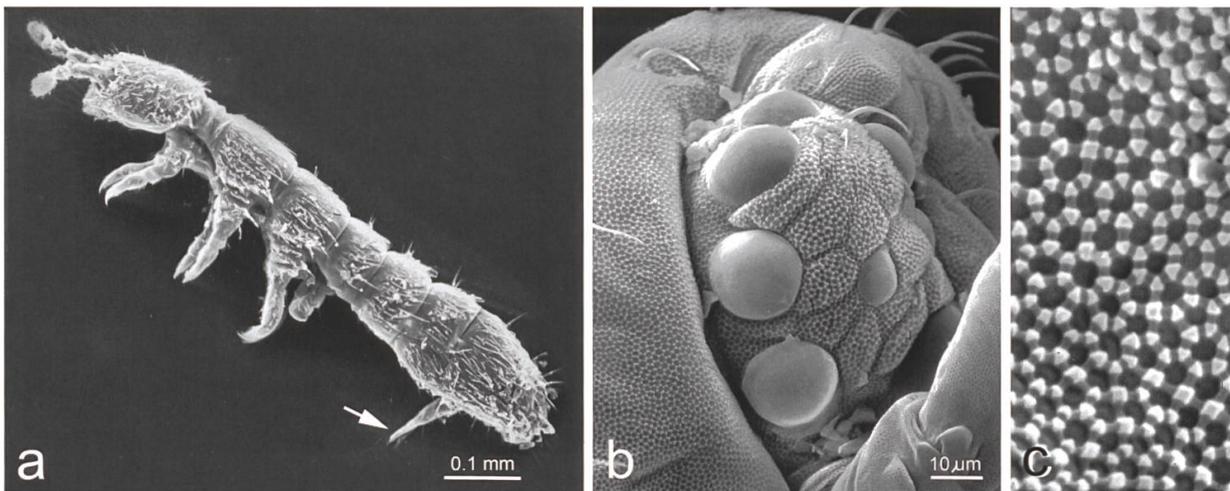


Abb. 16: Urinsekten gelten als die ursprünglichsten Insekten, weil ihnen Flügel fehlen. a) «Gletscherfloh» (*Isotoma saltans*) aus dem Aletschgebiet (leg. P. Ehrensperger); beachte die sog. *Sprunggabel* (Pfeil) am Hinterleib. b) Springschwänze (Collembola) besitzen eine typische, hexagonal strukturierte Körperoberfläche (Epicuticula). Die einfachen Augen bestehen aus 8 Einzelaugen. c) Starke Vergrößerung der Epicuticula: Der Abstand der erhabenen Eckpunkte beträgt nur 300 nm.

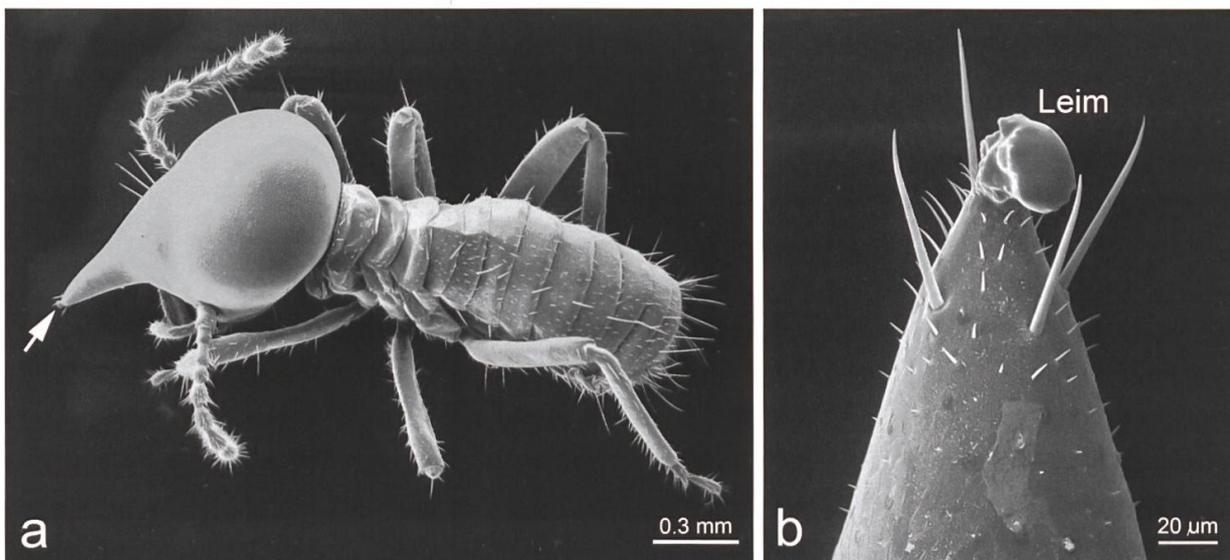


Abb. 17: a) Ein «Soldat» der baumlebenden Termiten *Nasutitermes* aus Panama (leg. W. Ribi). Der riesige augenlose Kopf ist zu einer spitzen Schnauze ausgezogen (Pfeil), aus der bei Bedrohung Leim gespritzt wird. b) Detail der Schnauzenspitze mit kleiner Leimkugel.

haben sie auch grosse Sozialstaaten entwickelt, allerdings mit einer anderen Organisation als bei den Hautflüglern. Im Kastensystem gibt es neben einer Königin (Fortpflanzungstier) auch einen König sowie Arbeiter (in beiden Geschlechtern) und Soldaten, die sich auf die Verteidigung spezialisiert haben. Wir konnten von einem Kollegen (Prof. W. Ribi) einige Termiten aus Panama bekommen und wollen hier kurz auf die Soldatenform der Gattung *Nasutitermes* eingehen. Auffallend ist dort der riesige Kopf, der nach vorne in eine lange «Schnauze» ausgezogen ist (Abb. 17a). Im Inneren des Kopfes liegen grosse Drüsen, die ein klebriges Sekret

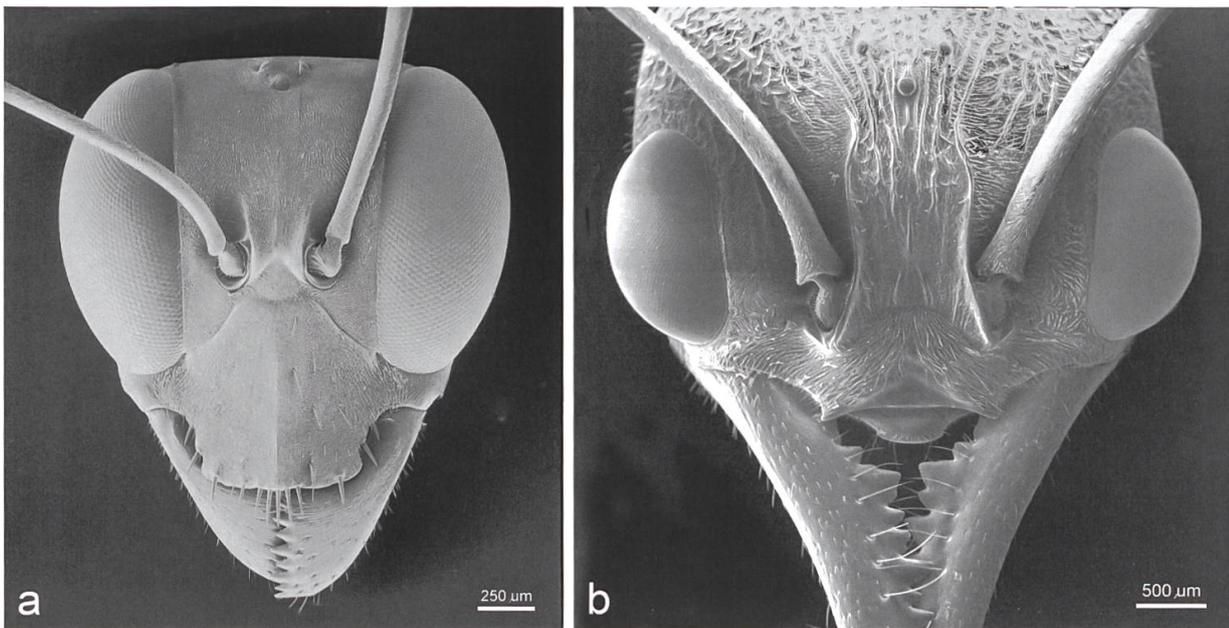


Abb. 18: Zwei Ameisenporträts: a) Die Schuppenameise *Gigantiops destructor* (Südamerika) gilt als die Ameise mit den grössten Komplexaugen – fast 2 mm im Durchmesser und mit 2000 Einzellinsen pro Auge. b) Die Bulldoggen-Ameise *Myrmecia pyriformis* (Australien) hat zwar etwas kleinere Augen, aber mächtige Kiefer, mit denen sie schmerzhaft beissen kann.

produzieren. Bei Bedrohung kann ein Soldat diesen Leim gezielt auf seine Gegner spritzen. Entsprechend bleiben oft kleine Leimkugeln an der «Nasenspitze» hängen (Abb. 17b). Die sonst gut entwickelten Kiefer (Mandibeln) sind bei diesen Soldaten stark reduziert. Die Facettenaugen sind ebenfalls völlig zurückgebildet (die Tiere leben ständig im Dunkel ihrer Baumnester).

3.4.3 Ameisen

Neben etlichen einheimischen Ameisenarten haben wir uns forschungsmässig vor allem mit afrikanischen Wüstenameisen (*Cataglyphis*) befasst, in Zusammenarbeit mit Prof. R. Wehner von der Universität Zürich. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf den Sinnesorganen, z. B. den diversen Borstenfeldern, welche Informationen über die Gelenkstellungen liefern. Hier sollen aber nur zwei interessante exotische Ameisen erwähnt werden, nämlich *Gigantiops destructor* («Grossäugiger Zerstörer») aus Südamerika und die Bulldoggen-Ameise *Myrmecia pyriformis* aus Australien. *Gigantiops* gilt als die Ameise mit den grössten Augen – mit bis zu 2000 Einzelaugen (Ommatidien) pro Facettenauge (Abb. 18a). Entsprechend sind die Tiere tagaktiv und orientieren sich visuell – die Beute, meist andere kleine Gliederfüssler, wird direkt angesprungen. Interessanterweise bestehen die Kolonien aus nur wenigen Hundert Individuen und gejagt wird immer nur einzeln. Eine Kooperation zwischen verschiedenen Arbeiterinnen, wie dies sonst bei Ameisen üblich ist, fehlt hier.

Myrmecia ist eine grosse (bis zu 4 cm!) und ziemlich aggressive Ameise. Mit ihren riesigen Kiefern (Abb. 18b) kann sie kräftig zubeissen und oft appliziert sie auch einen schmerzhaften Stich mit ihrem Giftstachel am Hinterleib. Ihr Sehvermögen

ist ebenfalls gut ausgeprägt, auch wenn die Augen deutlich kleiner sind als bei *Gigantiops*. Bulldoggen-Ameisen zählen stammesgeschichtlich zu den ursprünglichsten («primitivsten») Ameisen; während sie früher weltweit verbreitet waren, sind sie heute auf Australien beschränkt.

3.4.4 Bienen

Die Honigbiene hat im Biologieunterricht schon immer die Rolle eines «Modellinsekts» eingenommen, sowohl in der Theorie als auch im Praktikum. Klassische Themen sind etwa die Facettenaugen, die Fühler, die Putzrinne am 1. Bein, der Pollensammelapparat am 3. Bein, die Verhakung von Vorder- und Hinterflügel, das Tracheensystem und der Giftstachel. Alle diese Themenkreise können ergänzend mit dem REM untersucht werden, wobei oft wichtige Details zum Vorschein kommen, die im LM nur zu erahnen waren. Wir wollen im Folgenden einige der erwähnten Themen kurz besprechen und mit den entsprechenden REM-Bildern illustrieren.

3.4.4.1 Putzrinne

Am 1. Bein liegt an der Grenze von Tarsus und Tibia eine tiefe, halbkreisförmige Kerbe und genau dahinter eine stark verbreiterte Borste (*Fahne*) (Abb. 19a). Wenn eine Biene einen Fühler (Antenne) putzen will, klemmt sie diesen in diese Kerbe (*Putzrinne*) und drückt ihn gegen die Fahne. Dann wird der Fühler bis zur Spitze durch die satt anliegende Rinne gezogen und dabei werden alle anhängenden Fremdkörper abgestreift. Bei starker Vergrößerung erkennt man am Rand der Putzrinne feine Zähnchen, die wie die Zinken eines Kammes über die Sinneshaare des Fühlers streichen (Foelix & Kaufmann 1992). Solche Putzrinnen sind nicht nur bei den Bienen, sondern bei allen Hautflüglern, also auch bei Wespen, Hummeln und Ameisen, vorhanden. Bei den Ameisen ist die Putzrinne allerdings nur flach eingesenkt, dafür ist dort auch der Rand der Fahne in feine Zähnchen ausgezogen (Abb. 19b). Durch Zufall fanden wir im Alkoholmaterial eine Ameise, bei der gerade ein Fühler in der Putzrinne eingeklemmt war (Abb. 19c, d), so dass wir quasi eine Momentaufnahme des Putzvorganges vor uns hatten. Dabei wurde deutlich, dass der Fühler sowohl in der Rinne als auch vom gezähnten Rand der Fahne abgebürstet wird. Dass die Durchmesser von Fühler und Putzrinne übereinstimmen müssen, ist eigentlich zu erwarten, dass aber auch die Dimensionen der Kammzähnchen den zu reinigenden Sinneshaaren entsprechen, hat doch überrascht: Zwischen zwei benachbarte Zähnchen passt jeweils nur ein einziges Sinneshaar von ca. 5/1000 mm Durchmesser!

3.4.4.2 Pollensammelapparat

Die verschiedenen Beine einer Biene zeigen schön das biologische Prinzip der Arbeitsteilung: Während Bein 1 für die Reinigung der Fühler spezialisiert ist, besitzt Bein 3 einen komplexen Sammelapparat für Pollen. Hierfür ist ein Tarsalglied stark verbreitert und trägt auf der Innenseite etwa 10 Reihen kräftiger Borsten

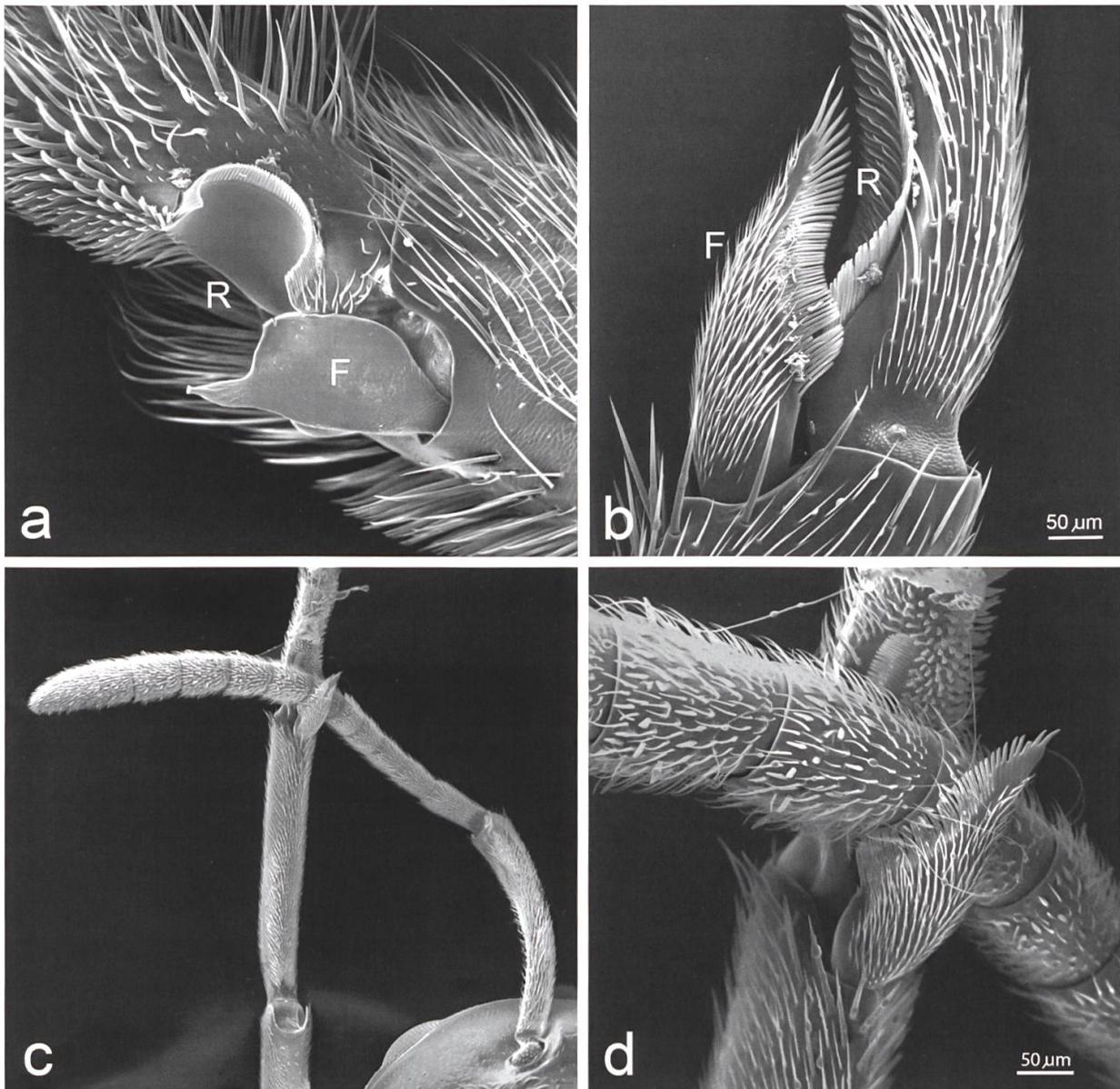


Abb. 19: Viele Insekten besitzen sog. *Putzrinnen* am 1. Bein, durch die sie ihre Fühler ziehen und dabei reinigen. a) Bei der Honigbiene ist die Putzrinne (R) halbkreisförmig und vom gleichen Durchmesser wie ein Fühler. Der Putzrinne gegenüber liegt die Fahne (F), eine verbreiterte Borste, die ebenfalls zum Abstreifen von Fremdkörpern dient. b) Bei Ameisen (*Cataglyphis*) ist die Putzrinne (R) nur flach eingesenkt, die Fahne (F) randlich stark gefiedert. c) Ein Ameisenfühler (*Formica*) in der Putzrinne des 1. Beines eingeklemmt. d) Detail des Fühlers, der beidseitig von feinen Cuticula-Zähnen der Putzrinne abgebürstet wird (aus Foelix 2012).

– die sog. Pollenbürste –, mit denen die Pollenkörner aus dem Haarkleid der Biene herausgebürstet werden (Abb. 20). Wenn die Pollenbürste mit Pollenkörnern vollgepackt ist, werden sie mit dem Pollenkamm des gegenüberliegenden Beines heraus gekratzt und auf die Aussenseite der Tibia geschoben. Dort häufen sie sich im sog. *Pollenkörbchen* allmählich zu einem kompakten Päckchen an, dem sog. *Pollenhöschen*.

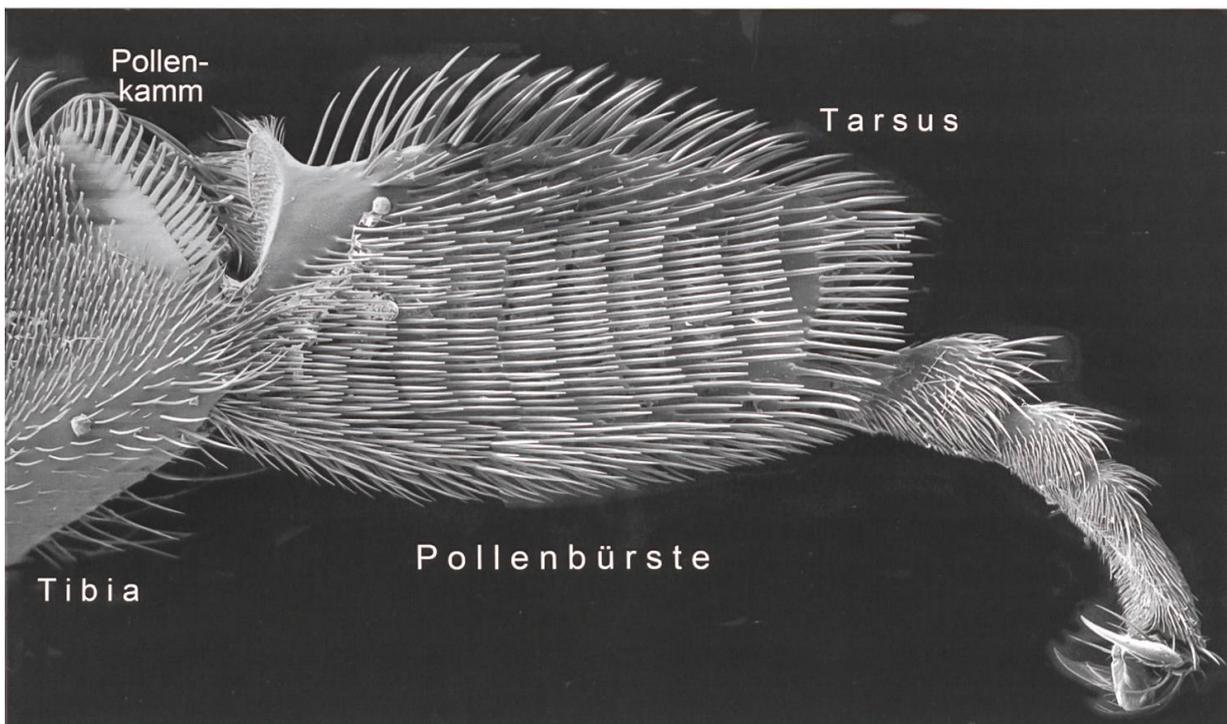


Abb. 20: Innenseite des Sammelbeines einer Honigbiene. Das grosse Tarsalglied trägt eine sog. Pollenbürste, die aus ca. 10 Borstenreihen besteht, mit denen die Pollenkörner aus dem Haarkleid der Biene herausgebürstet werden. Mittels des kräftigen Pollenkammes am Tibiarand werden die Pollen ins Pollenkorbchen auf der Rückseite der Tibia geschoben (aus Foelix & Erb 2012).

3.4.4.3 Pollenhöschen

Hat eine Biene ihre Pollenkorbchen mit genügend Blütenstaub gefüllt, so kehrt sie mit dicken Pollenhöschen in den Stock zurück (Abb. 21a – c). Schon vor fast 100 Jahren hat der bekannte Bienenforscher Karl von Frisch festgestellt, dass die meisten Bienen «blumenstet» sind, d. h., dass sie nur eine bestimmte Blumenart anfliegen. Falls dem wirklich so ist, dann dürfte eigentlich in einem Pollenhöschen nur eine Pollensorte vorhanden sein. Wir haben die Probe aufs Exempel gemacht und einige Bienen eingefangen, als sie gerade in einem Kirschbaum von Blüte zu Blüte flogen. Solche mit dicken Pollenhöschen haben wir danach im Mikroskop untersucht. Unter dem REM zeigte sich tatsächlich, dass etwa 98 % aller Pollenkörner die typische Struktur von Kirschpollen aufwiesen; nur ganz vereinzelt traten auch andere Typen von Pollenkörnern auf, z. B. vom Löwenzahn (Abb. 21d). Wir haben auch versucht, die Zahl der Pollenkörner in einem Pollenhöschen von 1–2 mm Durchmesser annähernd zu bestimmen (Abb. 21c). Bei einem Pollendurchmesser von 30 µm berechneten wir ca. 10 Mio. Pollenkörner pro Pollenhöschen (Foelix & Erb 2014a).

3.4.4.4 Flügelkopplung

Bei allen Hautflüglern (Bienen, Wespen, Hummeln, Ameisen) sind die Vorder- und Hinterflügel durch eine Häkchenreihe miteinander verbunden, so dass sie stets

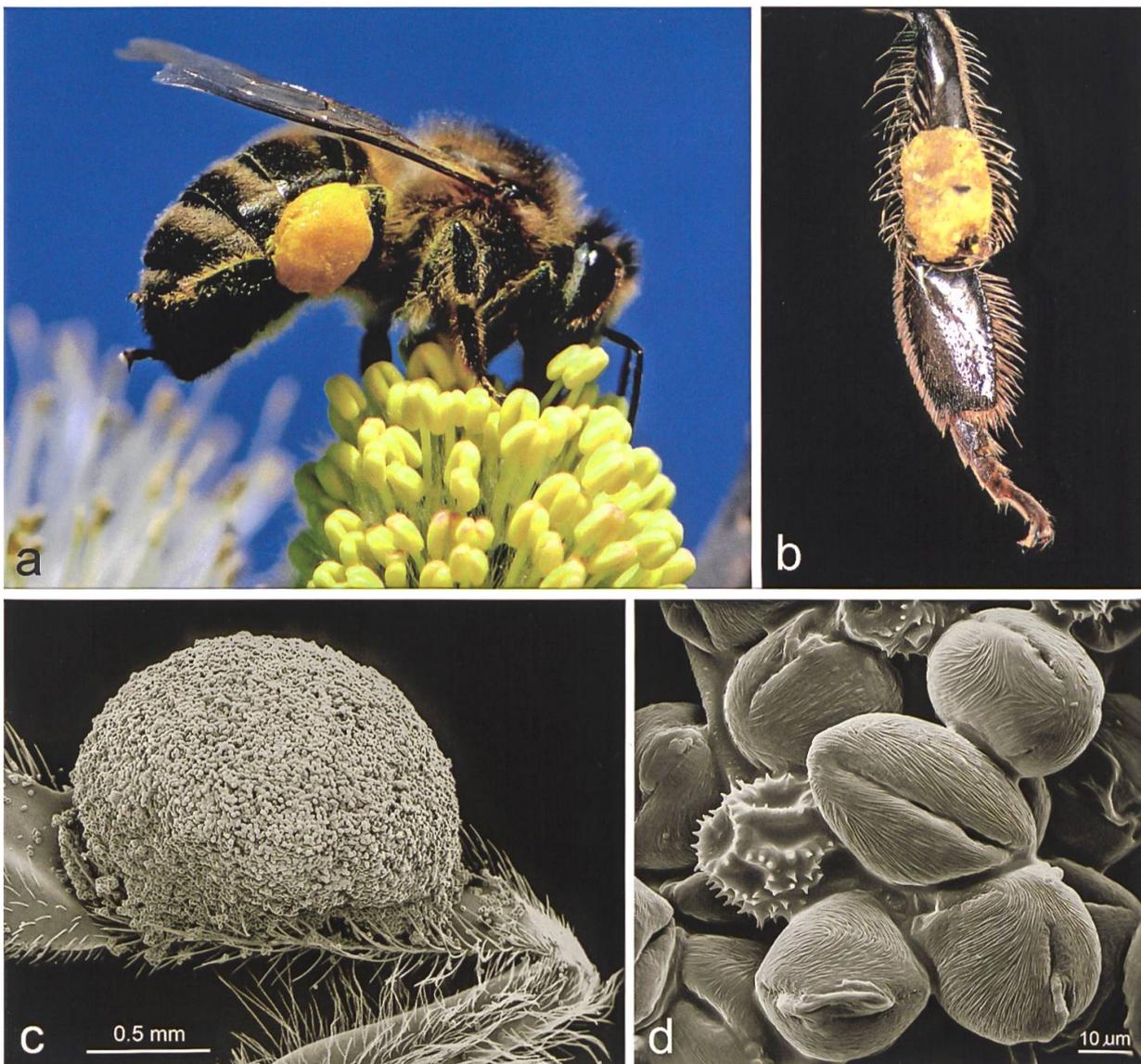


Abb. 21: a) Honigbiene auf Weidenblüte beim Pollensammeln. Beachte das gefüllte Pollenkörbchen am Hinterbein. b) Isoliertes Hinterbein mit Pollenhöschen auf der Tibia. c) Pollenhöschen unter dem REM. d) Detail aus c) mit mehreren Kirschkollen und einem stacheligen Pollenkorn aus einer Löwenzahnblüte (aus Foelix & Erb 2014a).

zusammen auf und ab schlagen. Am Vorderrand des Hinterflügels stehen 10–20 gekrümmte Borsten (*Hamuli*), die sich in die verdickte Hinterkante des Vorderflügels einhaken (Abb. 22). Nach einer Landung werden die Flügel flach über den Rücken gelegt und dabei wird diese Verbindung vollständig gelöst. Beim Wegfliegen werden sie wieder ausgeschwenkt und neu aneinandergeschnitten. Man spricht daher auch von einem «*biologischen Reissverschluss*».

3.4.4.5 Stachelapparat

Wie wir alle wissen, können Bienen und Wespen unangenehm stechen. Der Grund liegt in einem komplexen Stachelapparat, der im Hinterleib gelegen ist und bei Bedarf rasch ausgefahren werden kann. Der eigentliche Giftstachel mit anhängen-

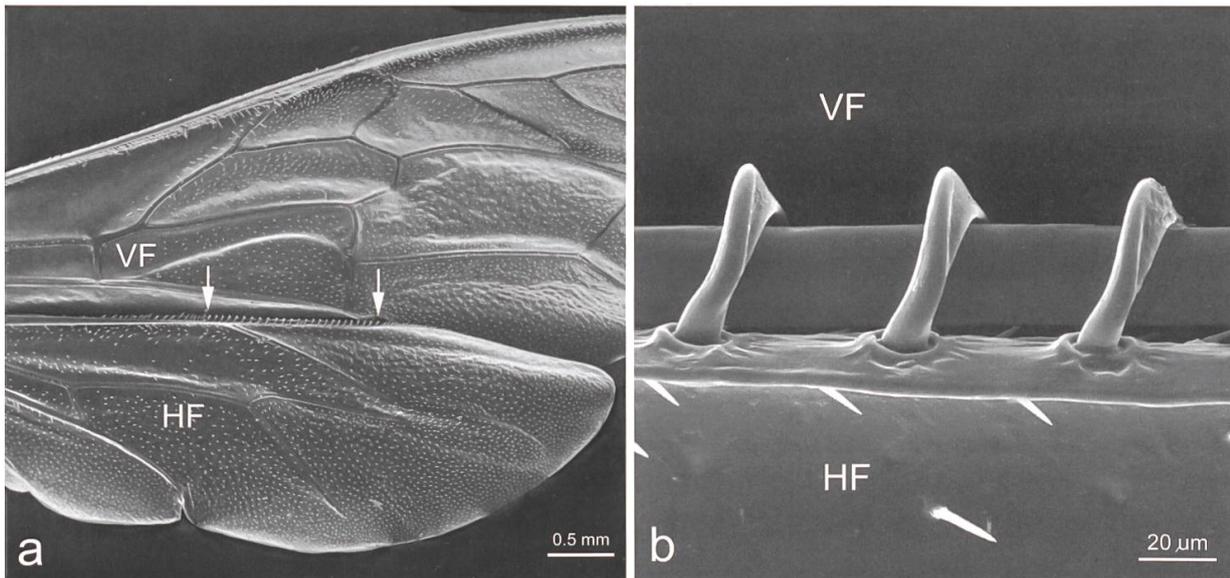


Abb. 22: Vorder- und Hinterflügel sind bei den Hautflüglern zu einer funktionellen Einheit verknüpft. a) Vorder- (VF) und Hinterflügel (HF) einer Honigbiene und ihre Verhakung zwischen den beiden Pfeilen. b) Detail von 3 Hähkchen des Hinterflügels (HF), welche die verdickte Hinterkante des Vorderflügels (VF) umgreifen.

der Giftdrüse macht nur einen Teil des ganzen Apparates aus (Abb. 23a). Er besteht aus drei Teilen, nämlich einer Stechrinne und zwei beweglichen Stechborsten, die seitlich kräftige Widerhaken besitzen (Abb. 23b). Der Giftkanal verläuft im zentralen Hohlraum, der von Stechrinne und Stechborsten umschlossen wird.

Es ist allgemein bekannt, dass eine Biene nur einmal stechen kann (weil meist Stachel und Giftdrüse in unserer Haut stecken bleiben), während wir von einer Wespe mehrfach gestochen werden können. Woran liegt das? Wie Abb. 23c schön zeigt, sind die Widerhaken an den Stechborsten der Wespe wesentlich feiner und erlauben deshalb ein Herausziehen des Stachels – im Gegensatz zu den massiven Widerhaken am Bienenstachel.

Da die Männchen (Drohnen) nicht stechen können, besagt die Lehrmeinung, dass der Giftstachel der Arbeiterinnen eigentlich ein umgewandelter Legestachel sei. Wir mussten diese Lehrbuchweisheit allerdings in Frage stellen, nachdem wir auch bei der Königin (einziges funktionales Weibchen) einen Giftstachel nachgewiesen haben (Foelix & Erb 2013).

3.4.4.6 Innere Organe: Muskeln und Tracheen

In der Einleitung wurde betont, dass nur absolut wasserfreie Objekte im REM untersucht werden können, und somit sind alle Weichteile eigentlich ausgeschlossen. Mit einigen technischen Tricks lässt sich dieses Problem allerdings umgehen, z. B. durch chemische Fixierung von Geweben und schonenden Wasserentzug (um Schrumpfungen weitgehend zu vermeiden). Die ideale Methode wäre die sog. «Kritische-Punkt-Trocknung», doch fehlt uns an der NKSA die hierfür nötige (und teure) Apparatur. Als Behelfslösung benutzen wir eine chemische Entwässerung

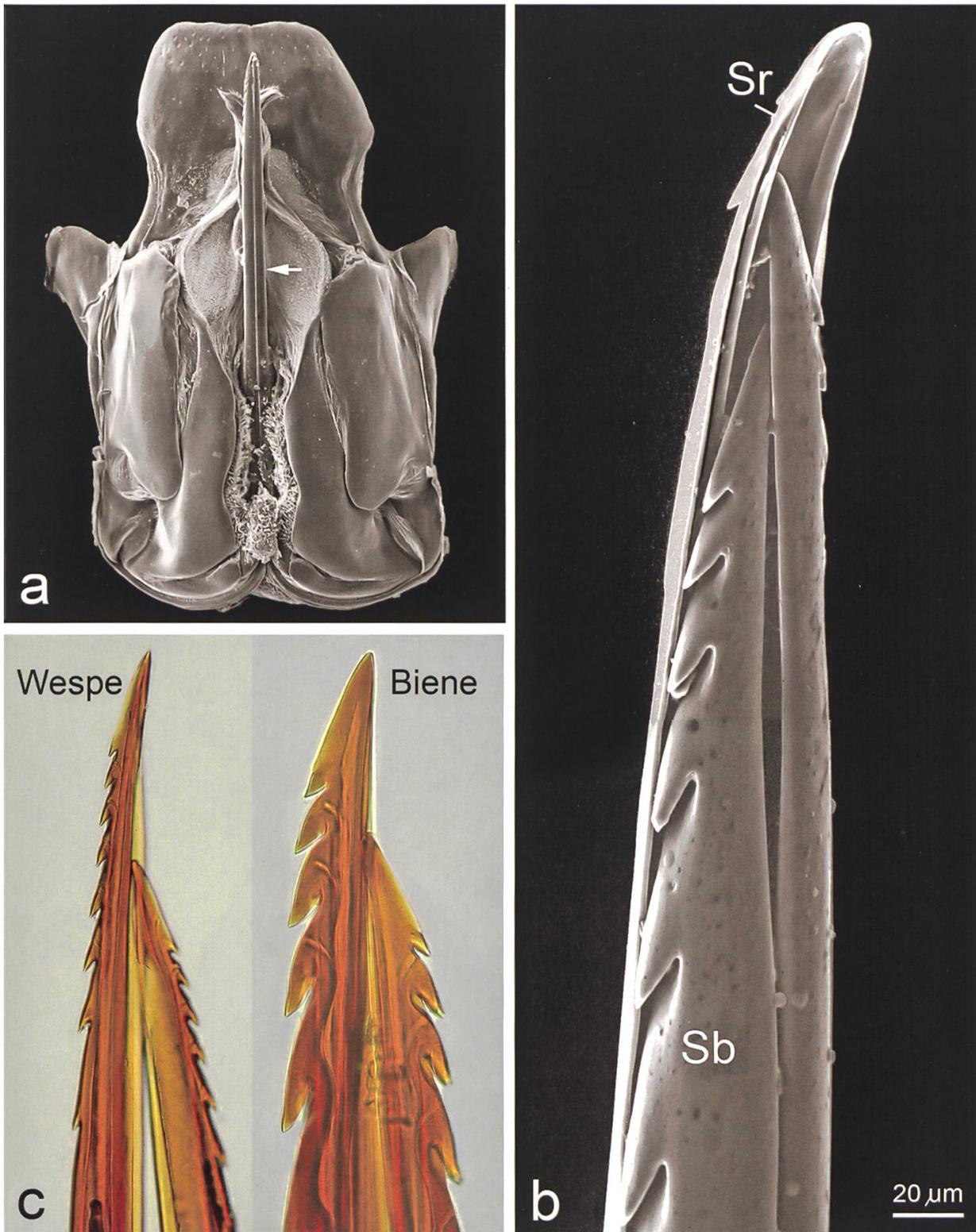


Abb. 23: Feinstruktur des Bienenstachels. a) Der eigentliche Giftstachel (Pfeil) ist nur ein relativ kleiner Teil des gesamten Stachelapparates im Hinterleib der Biene (REM). b) Der Stachel selbst besteht aus einer basalen Stechrinne (Sb), auf der zwei gezähnte Stechborsten (Sr) entlanggeschoben werden (REM). c) Ein Vergleich von Bienen- und Wespenstachel im LM zeigt, dass die Widerhaken beim Wespenstachel wesentlich feiner sind als bei der Biene – das erklärt, weshalb die Wespe ihren Stachel nach einem Stich wieder herausziehen kann, die Biene dagegen nicht (aus Foelix & Erb 2013).

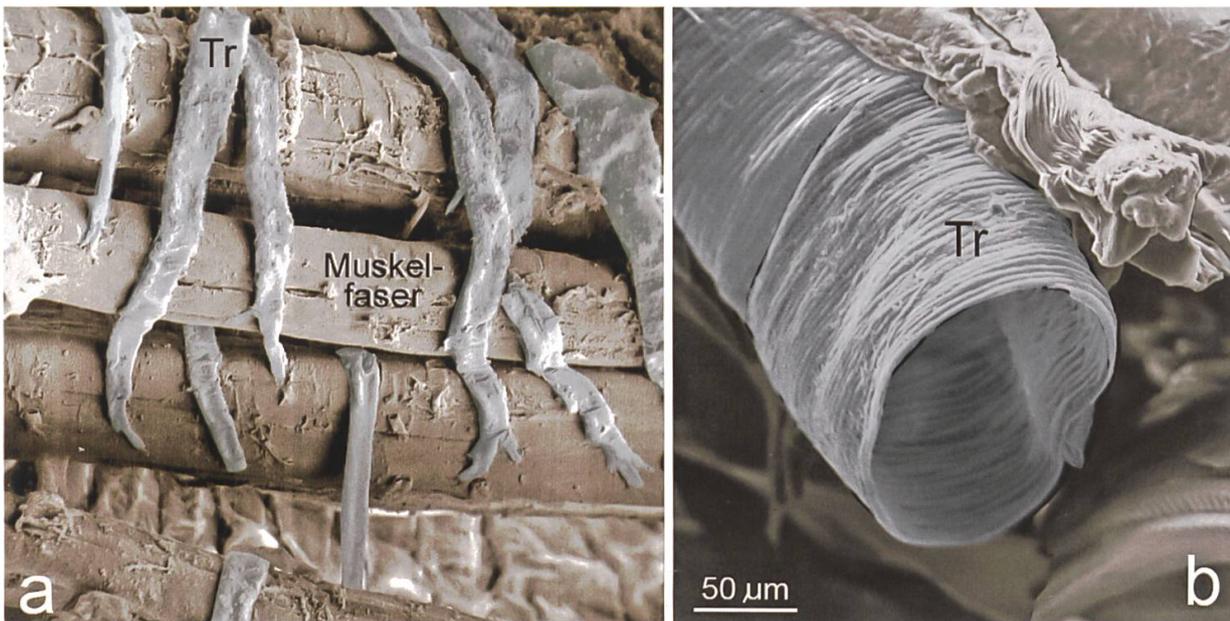


Abb. 24: Flugmuskulatur der Honigbiene. a) Die leistungsfähigen Flugmuskeln werden durch viele Tracheen (Tr) direkt mit Sauerstoff versorgt. Beachte, wie die Tracheenäste direkt in die Muskelfasern eindringen. b) Grosse Einzeltrachee (Tr) mit spiraliger Wandversteifung.

mit HMDS (Hexa-Methyl-Di-Silazan), die sich in vielen Fällen bewährt hat. Als Beispiel möchten wir hier die Flugmuskeln der Biene und ihre Versorgung mit Tracheen vorstellen.

Der ganze Brustteil (Thorax) ist vollgepackt mit Muskelbündeln, die dafür sorgen, dass die Flügel mit einer Schlagfrequenz von 100–200 pro Sekunde (!) bewegt werden. Halbiert man den Thorax längs, so blickt man auf einen Satz von senkrecht verlaufenden Muskelfasern, welche das Anheben der Flügel bewirken; darunter liegen waagrecht verlaufende Muskeln für das Absenken der Flügel. Da die Flugmuskeln zu den leistungsfähigsten Muskeln überhaupt zählen, müssen sie auch gut mit Sauerstoff versorgt werden. Hierfür ist das Tracheensystem zuständig, kleine Cuticula-Röhrchen, die von aussen tief ins Körperinnere vordringen und in den Endverzweigungen den Luftsauerstoff abgeben. Normalerweise endigen die Tracheenästchen in der Körperflüssigkeit (Blut). Das Besondere bei den Flugmuskeln ist nun, dass die feinsten Verzweigungen in die Muskelzelle eintreten, um den Sauerstoff direkt beim Endverbraucher (Mitochondrien) abzugeben. Sowohl die extensive Versorgung der Muskelzellen mit Tracheenästchen als auch das Eindringen in die Muskelzelle lässt sich im REM überzeugend demonstrieren (Abb. 24).

4. Wirbeltiere

Auch bei den Wirbeltieren eignen sich verschiedene Hartsubstanzen wie Knochen, Zähne, Federn oder Haare für eine Untersuchung mit dem REM.

4.1 Vogelfeder

Der Aufbau einer Vogelfeder (Konturfeder) lässt sich natürlich auch im LM studieren, wegen der fehlenden Tiefenschärfe ist es allerdings schwierig, die Räumlichkeit zu erfassen. Vom mittig gelegenen Schaft zweigen Seitenäste ab, die vielfach miteinander verhakt sind (Abb. 25a): Auf der einen Seite sind es mehrfach aufgegliederte Hakenstrahlen, auf der anderen glatte Bogenstrahlen. Jeweils ein Häkchen eines Hakenstrahls greift in einen gegenüberliegenden Bogenstrahl (Abb. 25b). Diese Verbindung ist ziemlich stabil, kann aber auch leicht gelöst werden – genau be- sehen auch ein «biologischer Reissverschluss». Der biologische Sinn dieser Kon- struktion liegt darin, die Federfläche an jeder beliebigen Stelle aufteilen zu können und durch einfaches Streichen über die Feder wieder eine kompakte Fläche herzu- stellen. Genau dies passiert, wenn ein Vogel Federpflege betreibt.

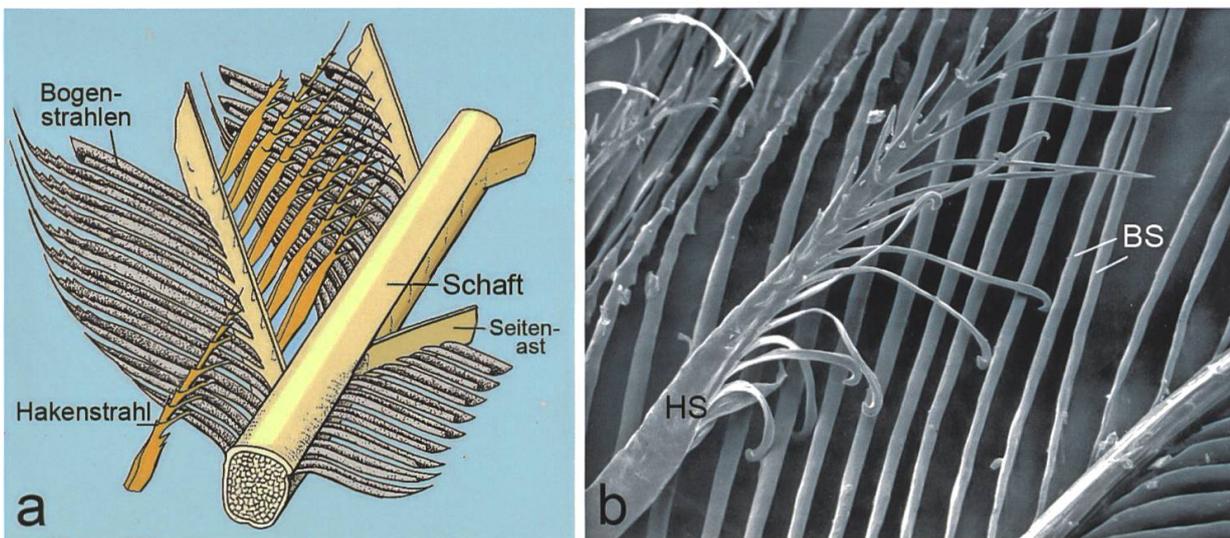


Abb. 25: Feinstruktur der Vogelfeder. a) Schema: Ein mehrfach gezählter Hakenstrahl greift in mehrere benachbarte Bogenstrahlen. b) Entsprechendes Bild im REM: Der Hakenstrahl (HS) ist über ein Dutzend Häkchen mit den Bogenstrahlen (BS) verbunden. Die Verhakung ist reversibel und wird deshalb als «*biologischer Reissverschluss*» bezeichnet.

4.2 Säuger: Haare und Knochen

Natürlich sind Schüler in erster Linie daran interessiert, wie ihre eigenen Haare im REM aussehen. Dabei sind einige durchaus kreativ und machen erst einmal einen Knoten in das Haar (Abb. 26a). Nüchtern betrachtet sind menschliche Haare relativ dick (50 – 80 μm) und leicht geschuppt – verschiedene Haartypen fehlen. Dagegen sind etwa Katzenhaare relativ dünn (15–25 μm) und man kann mindestens 3 verschiedene Typen unterscheiden. Ähnliches gilt für den Haarpelz von Fledermäusen (Abb. 26b), doch sind dort die Haare noch dünner (6–12 μm). Bei einigen Tieren, wie beim Biber, kommen neben vielen dünnen Wollhaaren (10–15 μm) auch lange und dicke Grannenhaare vor (bis 150 μm).

Im Vergleich zu den keratinhaltigen Haaren der Säugetiere sind die chitinhaltigen Haare der Insekten und Spinnen viel variabler. Als exotisches Beispiel hierfür zeigen

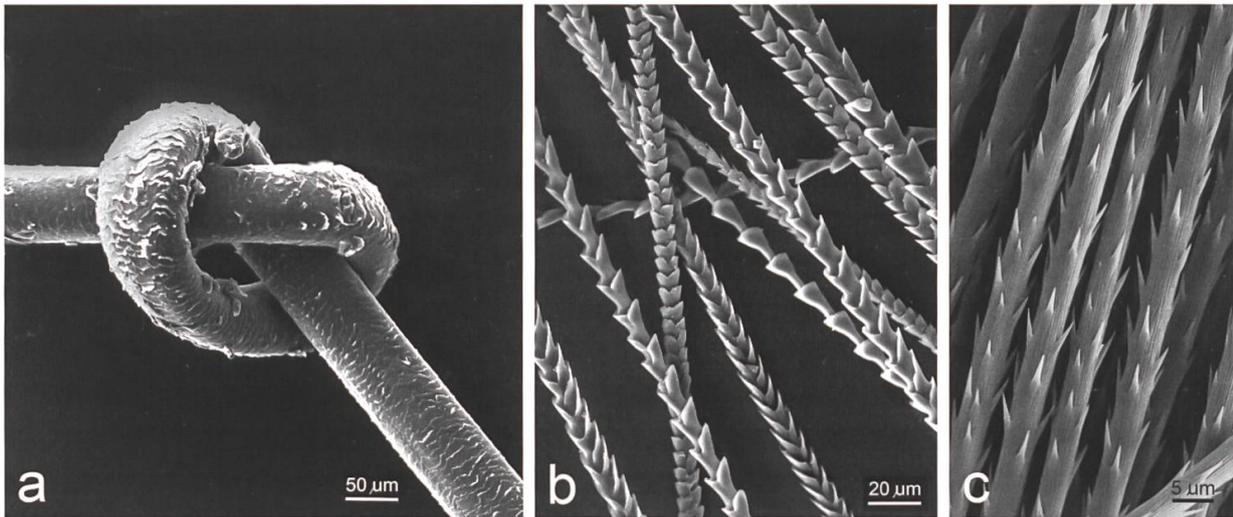


Abb. 26: Haare sind ein typisches Merkmal der Säugetiere. a) Menschliches Haar, das eine Schülerin im Biopraktikum verknotet hatte. b) Zwei verschiedene Haartypen aus dem Pelz einer Zwergfledermaus (*Pipistrellus*). c) Zum Vergleich sog. *Brennhaare* einer Vogelspinne (*Epehebopus*), die sich aufgrund ihrer Bestachelung in die Haut arbeiten und massive allergische Reaktionen auslösen (aus Foelix *et al.* 2009).

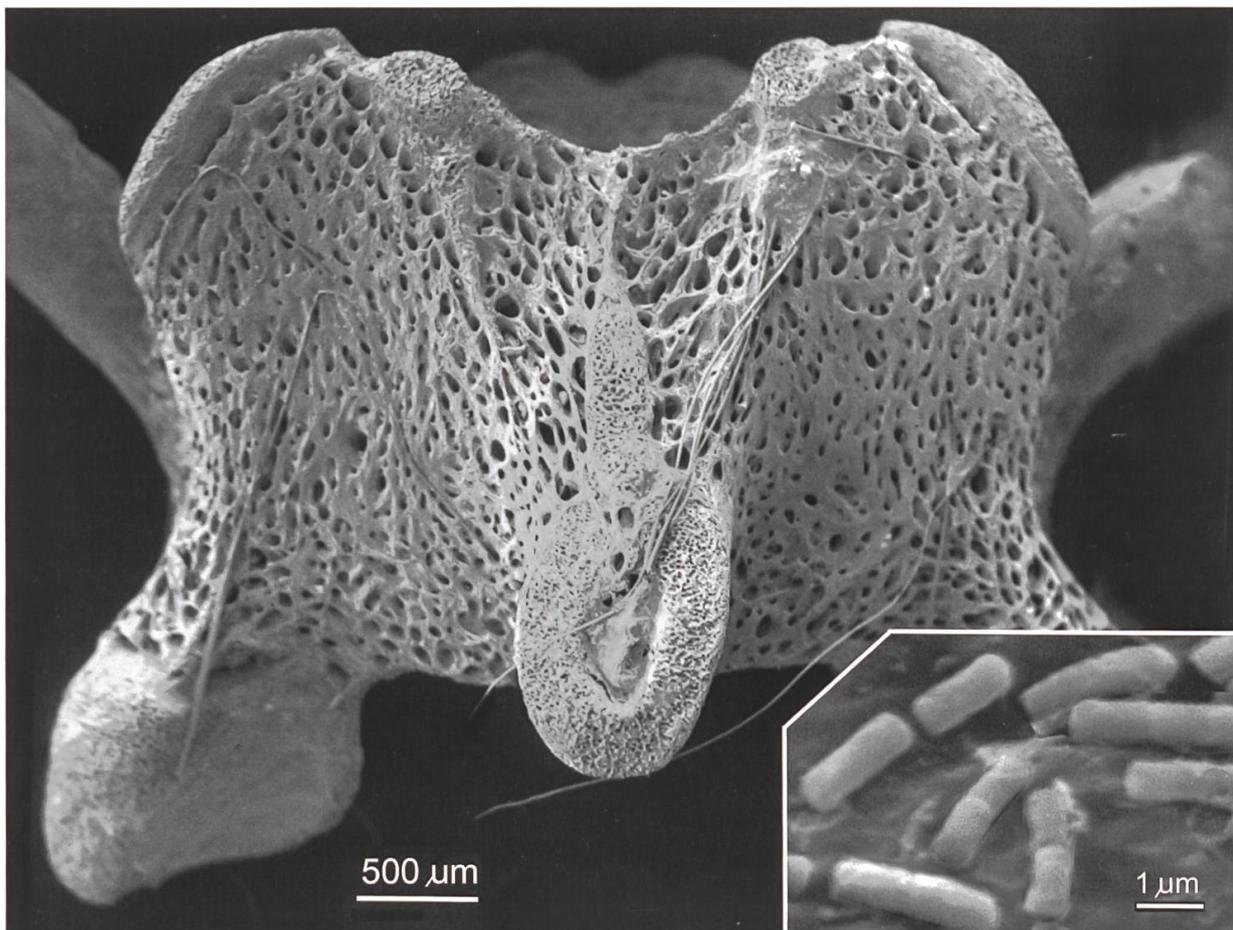


Abb. 27: Wirbelkörper eines Rattenkadavers, bei dem schon nach einigen Tagen der Verwesung die spongiöse Knochensubstanz freigelegt wurde. Inset: Zuständig für den raschen Abbau der Weichteile sind u. a. die hier gezeigten Stäbchenbakterien (aus der Maturaarbeit von Yaël Schmuziger & Sophie Welsche, NKSA 2010).

wir die speziellen «Brennhaare», welche gewisse Vogelspinnen bei Bedrohung vom Hinterleib abbürsten (Abb. 26c). Da sie sehr klein und leicht sind, gelangen sie leicht in unsere Atemwege, und da sie mit winzigen Widerhaken versehen sind, dringen sie tief in die Haut ein und lösen starken Juckreiz und allergische Reaktionen aus (Foelix *et al.* 2009).

Beim Zersetzungsprozess von Kadavern sind Haare und Knochen relativ resistent, während die Weichteile ziemlich schnell durch Fliegenmaden und durch Mikroorganismen abgebaut werden. Dies wurde in einer Maturaarbeit der NKSA (2010) von Yaël Schmuziger und Sophie Welsche genauer untersucht; dabei konnten verschiedene Stäbchenbakterien nicht nur lichtmikroskopisch, sondern auch im REM gut demonstriert werden (Abb. 27).

5. Pflanzen

Aufgrund ihrer festen Zellwände sollten sich Pflanzen eigentlich gut für REM-Untersuchungen eignen. Allerdings gilt dies nur für Pflanzenteile mit geringem Wassergehalt, z. B. Rinde, Holz, Samen und Pollenkörner; alle anderen Gewebe, z. B. Blätter, Blüten, Wurzeln, erleiden bei der Präparation (Entwässerung) meist eine starke Schrumpfung. Wir stellen hier einige günstige Objekte vor, die auch in trockenem Zustand noch recht lebensnah aussehen.

5.1 Kork und Holz

Bekanntlich wurden ja die ersten Zellen von Robert Hooke 1665 beschrieben, anhand dünner Schnitte von einem Flaschenkork. Auch im heutigen Biopraktikum wird das Zellkonzept meist anhand von Kork- oder Holundermark-Schnitten demonstriert. Im LM bietet sich dann praktisch das gleiche Bild, das auch Hooke in seiner *Micrographia* gezeichnet hat, nämlich ein feines Netzwerk von «*little boxes, or cells*». Hooke hat zwar als Erster den Begriff «Zelle» eingeführt, war sich aber nicht bewusst, dass er nur die toten Zellwände vor sich hatte. Der eigentliche Zellbegriff im Sinne von Zelle als *kleinstem Baustein des Lebens* entstand erst 200 Jahre später. Während Korkzellen im LM als zweidimensionales Netzwerk erscheinen, sehen sie unter dem REM deutlich dreidimensional aus (Abb. 28a) – eben wie winzige Kammern (lat. *cellulae*). Ganz entsprechende Bilder erhält man, wenn man Holundermark oder auch Balsaholz schneidet. Bei «normalem» Holz sind die Zellen ähnlich angeordnet, aber die Zellwände sind wesentlich dicker und deshalb mechanisch stabiler. Die Zellform ist rundlich oder polygonal, so dass ein Deckgewebe in Aufsicht wie ein winziges Kopfsteinpflaster erscheint (Abb. 28b).

5.2 Ursprüngliche Nadelhölzer: Cycas und Ginkgo

Die Palmfarne (Cycadales) besitzen zwar palmähnliche Stämme und farnartige Blätter, gehören aber systematisch zu den ursprünglichen Blüten- oder Samenpflanzen. Wir haben die Blätter von *Cycas revoluta* mikroskopisch untersucht, ob der Blattaufbau

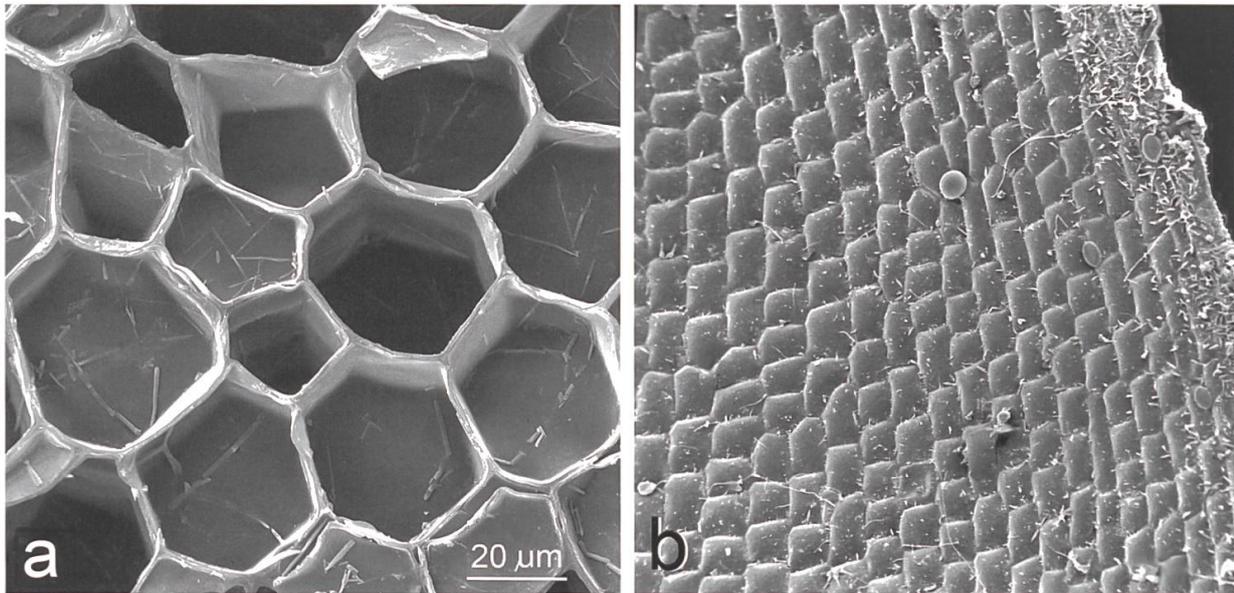


Abb. 28: Pflanzliche Zellen. a) Querschnitt eines Flaschenkorken – an diesem Objekt hat Robert Hooke 1665 erstmals «*little boxes, or cells*» beschrieben. Erst im REM wird die Räumlichkeit der Korkzellen deutlich. b) Die Blattoberfläche der Wasserpest (*Elodea*) erscheint wegen der rechteckigen Epidermiszellen wie ein Kopfsteinpflaster.

noch relativ ursprünglich oder bereits höher entwickelt ist. Tatsächlich zeigen Blattquerschnitte sowohl im LM (Abb. 29a) als auch im REM eine deutliche Differenzierung in obere Epidermis, Hypodermis, Palisadenschicht, Transfusionsgewebe (Wasserleitung), Schwammgewebe und untere Epidermis mit Spaltöffnungen (Stomata). Mit anderen Worten, der Blattaufbau bei *Cycas* ist genauso komplex wie bei höheren Blütenpflanzen.

Ginkgo zählt ebenfalls zu den altertümlichen Pflanzen («Lebendes Fossil»), gewissermassen zwischen Nadelbäumen und Laubbäumen stehend. Auch hier stellte sich die Frage, ob die typischen dreieckigen Blätter eher wie Nadeln oder mehr wie Laubblätter aufgebaut sind. Tatsächlich ähneln Blattquerschnitte stark dem oben beschriebenen Bild vom *Cycas*blatt. Allerdings erlebten wir eine grosse Überraschung, als wir Querschnitte von Blattstielen anfertigten: Sie zeigen eine frappierende Ähnlichkeit mit Nadel-Querschnitten einer Kiefer (Abb. 29c, d). So sind zwei zentrale Leitbündel umgeben von einem Endodermis-Zylinder und einem lockeren Mesophyll mit typischen Harzgängen. Hiermit wird die systematische Zugehörigkeit von Ginkgo zu Nadelbäumen (Coniferen) überzeugend bestätigt.

5.3 Fossile Nadelhölzer: *Sequoia* und *Araucaria*

Es ist bemerkenswert, dass man mit dem REM nicht nur heutiges Holz gut untersuchen kann, sondern auch subfossiles und sogar fossiles. So haben wir etwa eiszeitliches Nadelholz (ca. 50 000 Jahre alt) aus dem Untergrund der Sondermülldeponie Kölliken genauer angeschaut und praktisch die gleichen Strukturen angetroffen wie bei rezenten Fichten. Wir hatten aber auch Gelegenheit, versteinertes Holz aus dem

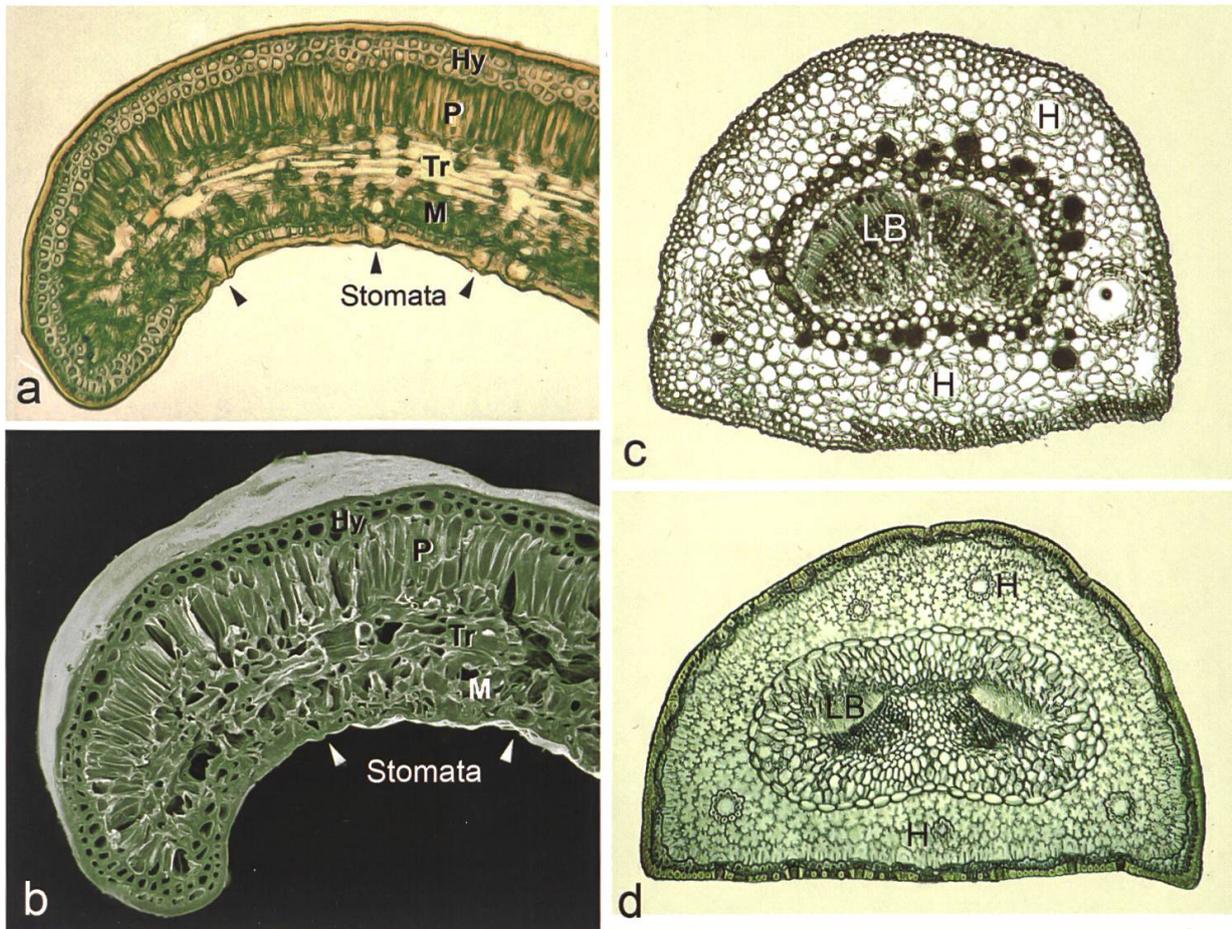


Abb. 29: Blattaufbau des Palmfarns *Cycas revoluta*. a) Blattquerschnitt mit dicker Oberflächen-Cuticula (gelb), darunter eine 2-schichtige Hypodermis (Hy), eine ausgeprägte Palisadenschicht (P) und ein lockeres Mesophyll (M) – dazwischen ein querverlaufendes Transfusionsgewebe (Tr); auf der Blattunterseite mehrere Spaltöffnungen (Stomata). b) Entsprechender Querschnitt im REM. c) Querschnitt durch den Blattstiel von *Ginkgo biloba*. In der Mitte liegen zwei Leitbündel (LB), im umgebenden Mesophyll mehrere Harzgänge (H). d) Der prinzipiell gleiche Aufbau zeigt sich beim Querschnitt einer Kiefernadel (*Pinus nigra*). Fotos a, c, d: B. Erb.

Tertiär (Eozän) und dem Erdmittelalter (Trias) zu untersuchen, und waren erstaunt, wie gut diese Proben erhalten waren – bis in zelluläre Details (Foelix & Erb 2011).

5.3.1 Mammutbaum (*Sequoia*)

Wir konnten einige Proben von fossilem Mammutbaumholz aus den *Florissant Fossil Beds* (Eozän, 35 Mio. Jahre) in Colorado untersuchen und haben diese mit rezentem Mammutbaumholz (Aarau) verglichen (Abb. 30a). Wie bei allen Nadelhölzern besitzen die längsverlaufenden Tracheiden viele grosse Hoftüpfel (Ventilverbindungen zu Nachbarzellen), während die querverlaufenden Markstrahlen wenige, kleine Tüpfel in ihren Zellwänden aufweisen (Abb. 30b). Auch in den fossilen Proben liegen praktisch die gleichen Verhältnisse vor. Alle Feinheiten der Hoftüpfel wie etwa der zentrale Ventilpfropf (*Torus*) samt Aufhängefasern sind im versteinerten Holz über Jahrtausende erhalten geblieben (Abb. 30c – e).

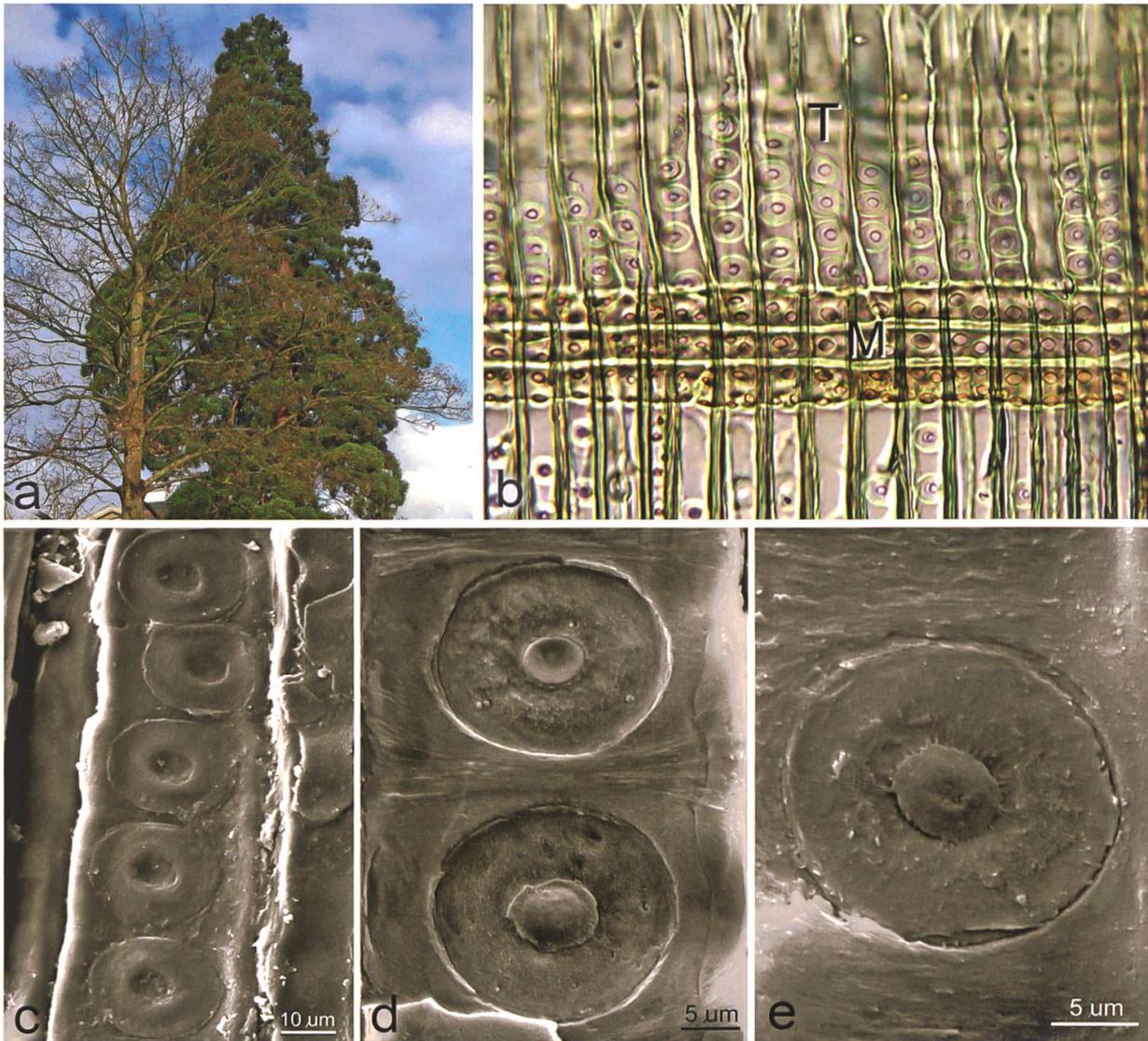


Abb. 30: Mammutbaum: heute und fossil. a) Mammutbaum (*Sequoiadendron giganteum*) neben der Aarauer Kirche St. Peter und Paul. b) Längsschnitt durch Mammutbaumholz mit senkrecht-verlaufenden Tracheiden (T) und einem waagrechten Markstrahl (M); beachte die grossen Hoftüpfel in den Tracheiden und die kleinen Tüpfel im Markstrahl. c–e) Fossiles Mammutbaumholz (35 Mio. Jahre). c) Tracheide mit typischen Hoftüpfeln. d) 2 Hoftüpfel im Längsbruch mit zentralem Torus. e) Hoftüpfel mit radialen Aufhängefasern des Torus (aus Foelix & Erb 2011).

5.3.2 Araukarie (*Araucarioxylon arizonicum*)

Wesentlich ältere versteinerte Hölzer liegen im Petrified-Forest-Nationalpark in Arizona vor, nämlich aus der oberen Trias (über 200 Mio. Jahre). Wir konnten einige kleine Stücke Araukarienholz aus Arizona längsspalten und unter unserem REM betrachten – ebenfalls im Vergleich mit heutigem Araukarienholz (*Araucaria araucaria*). Auch hier war die Nadelholz-Grundstruktur klar erkennbar, allerdings fehlten die zellulären Details. Der Grund für die schlechtere Strukturhaltung (im Vergleich zum eozänen Mammutbaumholz) dürfte an der unterschiedlichen Gesteinsbildung liegen: Während die Bäume in Florissant (Colorado) sehr rasch durch Vulkanasche bedeckt wurden, handelt es sich im Petrified Forest durchwegs um Schwemmholz, das erst nach längerem Transport und beginnender Zersetzung eingebettet wurde.

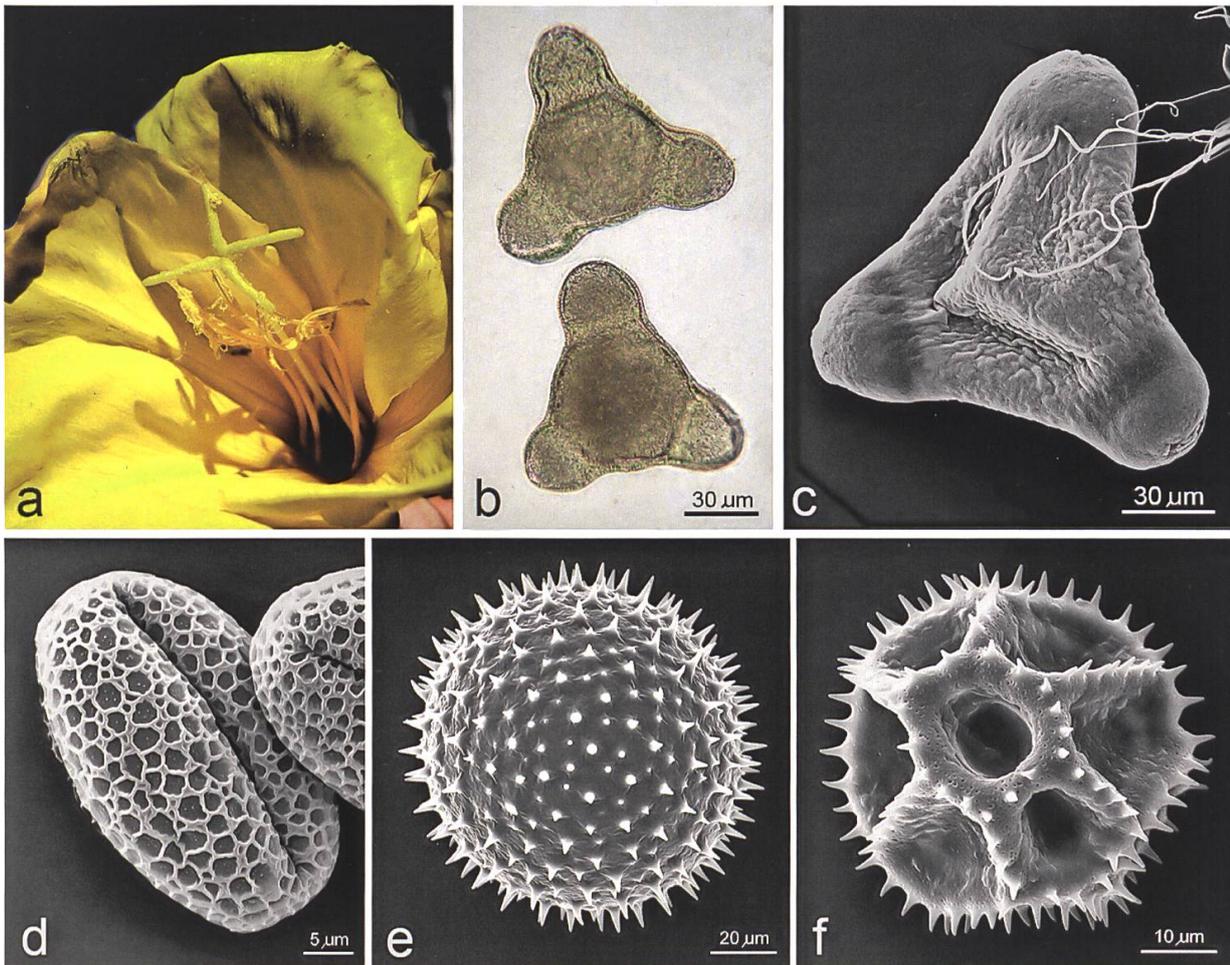


Abb. 31: Pollenstruktur. a–c) Nachtkerze *Oenothera biennis*. a) Blüte mit 4-teiliger Narbe und 8 Staubgefässen. b) 2 Pollenkörner im Lichtmikroskop. c) Ein Pollenkorn im REM, mit klebrigen Viscinfäden, welche mehrere Pollenkörner verbinden. d) Pollenkorn einer Forsythie mit netzartiger Oberfläche. e) Pollenkorn einer Malve mit stacheliger Oberfläche. f) Pollenkorn einer Wegwarte mit gefelderter, stacheliger Oberfläche.

5.4 Pollenstruktur

Pollenkörner der verschiedenen Blütenpflanzen sind seit langem ein Lieblingsobjekt für REM-Untersuchungen, und entsprechend gab es auch öfters Schulprojekte (NKSA, AME) um einen sog. «Pollenatlas» zu erstellen (Müller & Oswald 2001). Das liegt daran, dass die Pollenkörner einerseits sehr vielgestaltig sind (Abb. 31), andererseits aber innerhalb einer Pflanzenfamilie ziemlich gleichartig aussehen (und damit auf Verwandtschaft hinweisen). Als Lehrbuchweisheit gilt übrigens, dass die sog. «Windblütler» glatte Pollenkörner besitzen, während die von Insekten bestäubten Blüten («Insektenblütler») eher raue, stachelige Pollen aufweisen. Als wir die Probe aufs Exempel gemacht haben, konnten wir allerdings eine solch einfache Einteilung nicht bestätigen (Foelix & Erb 2014a). Erstens gibt es etliche Ausnahmen von dieser Regel, und zweitens sind die Oberflächen vieler Pollenkörner so vielgestaltig, dass sie häufig nicht eindeutig als «glatt» oder «rau» eingestuft werden können. Nur ein Beispiel: Krokuspollen sind nur leicht körnig strukturiert, d. h. eigentlich «glatt», werden aber

eindeutig von Bienen eingesammelt und übertragen. Natürlich lassen sich selektiv immer gute Beispiele für *Windblütler* und *Insektenblütler* finden, aber insgesamt ist diese Einteilung doch eine starke Vereinfachung.

Ein allgemeines biologisches Problem lässt sich anhand der Grösse der Pollenkörner (meist nur 30 μm) aufzeigen: Wie kann ein winziges Pollenkorn (männliche Fortpflanzungszelle) einen langen Pollenschlauch austreiben, damit der männliche Zellkern über mehrere cm zur weiblichen Eizelle im Fruchtknoten transportiert werden kann? So muss etwa ein Pollenkorn der Nachtkerze (Abb. 31a–c) in kurzer Zeit einen Pollenschlauch von 10 cm Länge erzeugen. Wir haben ausgerechnet, dass das Volumen des Pollenschlauches etwa 3000–4000 \times grösser ist als das des Pollenkornes – woher stammt das neue Zellplasma und woher kommt die Energie für diese enorme Syntheseleistung? Darüber verlieren die meisten Lehrbücher kein Wort und man muss schon Spezialliteratur zu Rate ziehen, um eine mögliche Antwort zu bekommen (offenbar kann das umgebende Griffelgewebe das Pollenwachstum unterstützen).

6. Forschungsprojekte

Neben den bisher erwähnten kleineren Studien wurden im Lauf der Jahre auch einige grössere Forschungsprojekte durchgeführt, vor allem auf dem Gebiet der Spinnenkunde (Arachnologie). Die wichtigeren Arbeiten wurden jeweils in internationalen Fachzeitschriften publiziert und einige sollen im Folgenden kurz präsentiert werden.

6.1 Strukturfarben

Auf Vogelspinnenbörsen gehören blau schillernde Vogelspinnen zu den begehrtesten (und teuersten) Objekten. Die naheliegende Frage, worauf diese frappierende Blaufärbung eigentlich beruht, konnte allerdings niemand beantworten. Wir haben versucht, dies bei der südamerikanischen Spinne *Epebopus cyanognathus* (Abb. 32) und der indischen *Poecilotheria metallica* aufzuklären. Zunächst liess sich rasch feststellen, dass die blaue Färbung auf kleine Haare beschränkt ist, während die eigentliche Körpercuticula schwarzbraun erscheint. Je nach Winkel des einfallenden Lichtes wechselt die Farbe der blauen Haare auch ins Blaugrün oder Violett – ein typisches Merkmal von sog. *physikalischen* oder *Strukturfarben*. Dabei beruht die Farbverschiebung (*Interferenz*) meist auf dünnen Plättchen (Nanometer-Bereich), die eng übereinandergeschichtet sind. Eine genaue Analyse der blauen Haare im REM und TEM zeigte tatsächlich, dass die Haarschäfte einen lamellierten Aufbau besitzen, wobei dünne Cuticulaschichten (65 nm) und luftgefüllte Zwischenräume regelmässig abwechseln. Auch die knallgelben Haare von *Poecilotheria* besitzen einen lamellären Aufbau, allerdings weniger regelmässig angeordnet. In jedem Fall liegen bei den farbigen Haaren keine Farbpigmente vor, sondern es sind rein physikalische Farben, die durch Interferenz an den fein lamellierten Haaren entstehen (Foelix *et al.* 2013).

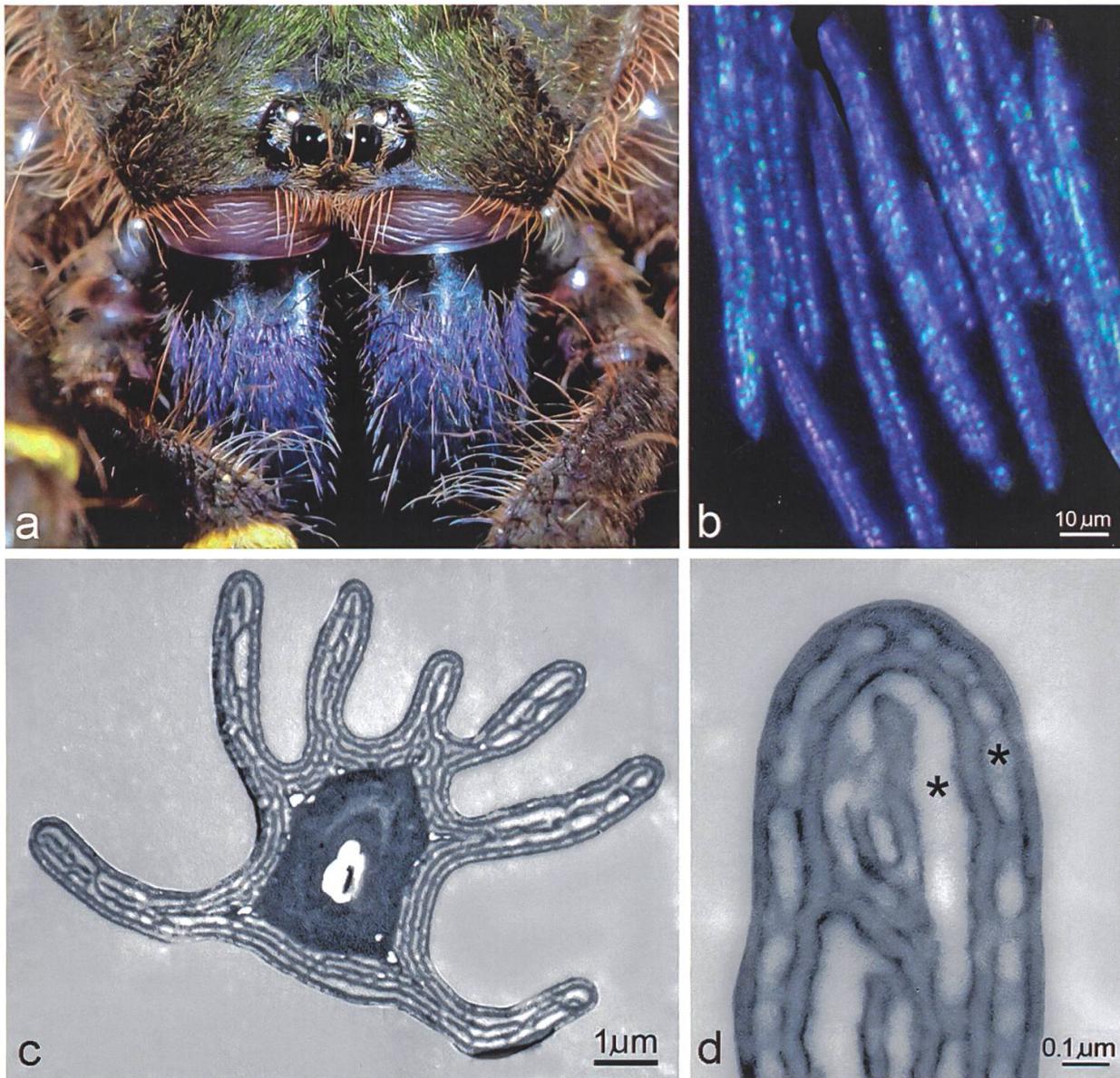


Abb. 32: Blaue Strukturfarbe bei der Vogelspinne *Ephebopus cyanognathus*. a) Die leuchtend blaue Färbung der Cheliceren ist durch blaue Haare bedingt. b) Die blauen Haare bei starker Vergrößerung im Lichtmikroskop (Auflicht). c) Querschnitt eines blauen Haares im Transmissions-EM. Beachte die fein lamellierten Rippen des soliden Haarschaftes. d) Die regelmässige Lamellierung der Cuticula (abwechselnd mit Lufträumen, Sterne) verursacht die Blaufärbung durch eine Interferenz des einstrahlenden Weisslichtes (aus Foelix *et al.* 2009)

Etwas später erfuhren wir, dass es selbst im Pflanzenreich blauschillernde Strukturen gibt, z. B. die Blätter eines tropischen Farns (*Microsorium thailandicum*). Erste Handschnitte zeigten, dass die blaue Färbung in den dicken Zellwänden der Epidermiszellen liegt (Abb. 33a). Bei sehr hohen Vergrößerungen im REM kommen in angeschnittenen Zellwänden feine Zelluloselamellen zum Vorschein (Abb. 33b, c) – mit anderen Worten, auch hier liegt der gleiche Mechanismus der Farbentstehung vor, wie oben bei den Spinnenhaaren beschrieben (Foelix *et al.* 2012).

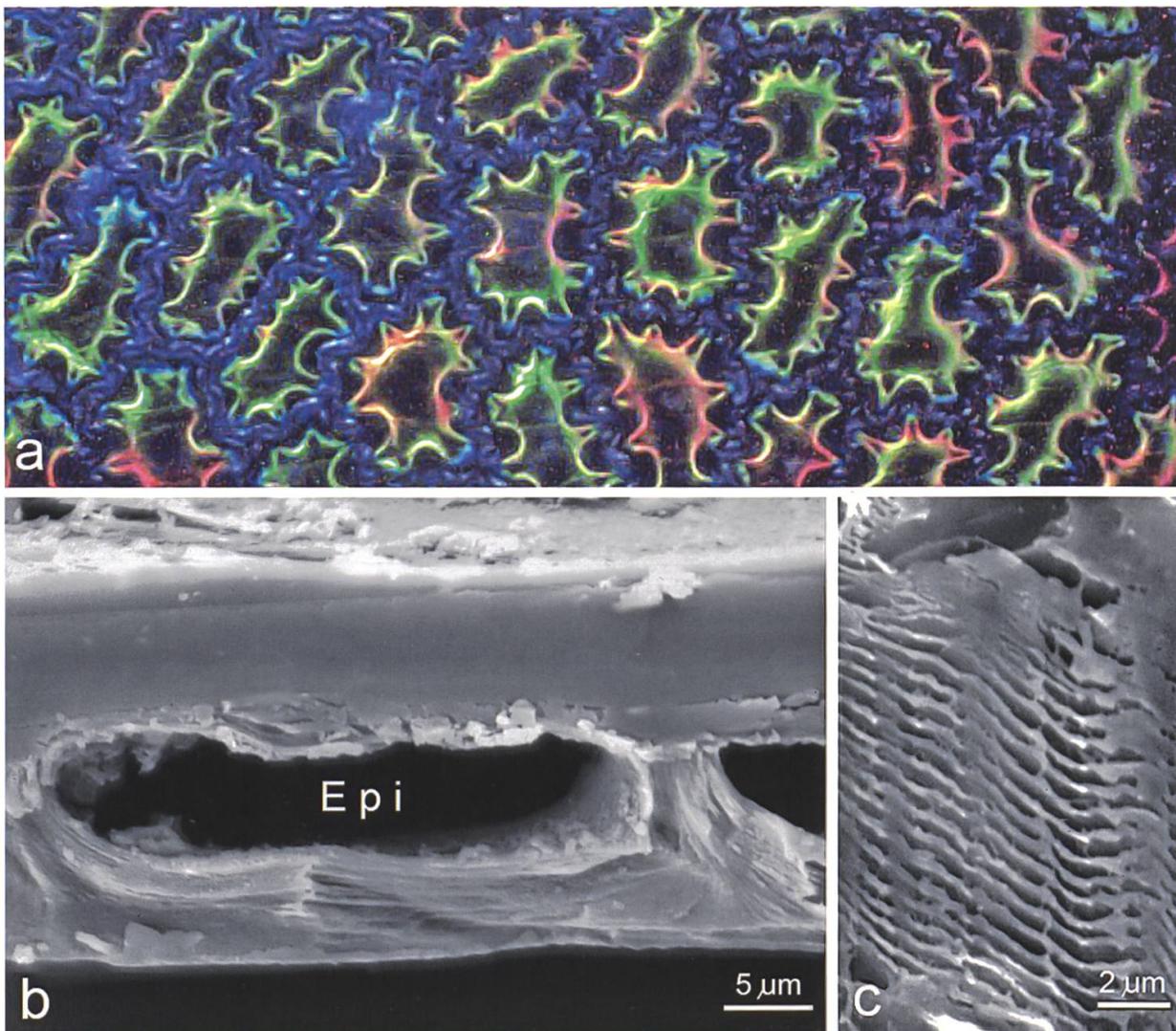


Abb. 33: Irisierende Strukturfarben treten auch bei Pflanzen auf, z. B. bei gewissen Farnblättern (*Microsorium thailandicum*). a) Ein Flachschnitt der Blattoberfläche zeigt die Epidermiszellen, deren dicke Zellwände blau erscheinen. b) Im REM deutet sich eine Lamellierung in den Zellwänden der Epidermiszellen (Epi) bereits bei geringen Vergrößerungen an. c) Bei hoher Vergrößerung treten die dünnen Zellose-schichten, welche die Blaufärbung bewirken, deutlich hervor (aus Foelix *et al.* 2012).

6.2 Spinnrüsen an Spinnenfüssen?

Spinnen besitzen am Hinterleibsende mehrere Spinnwarzen mit vielen feinen Düsen (Spinnspulen), aus denen die dünnen Spinnfäden (ca. 1 µm) austreten. Vor einigen Jahren erschien in der renommierten Fachzeitschrift *Nature* ein Artikel, in dem behauptet wurde, Vogelspinnen besäßen auch an ihren Füßen (Tarsen) solche Spinnspulen. Diese sollten feinste Fäden absondern können, welche eine grosse Spinne beim Klettern an glatten senkrechten Flächen (z. B. Glas) vor einem Absturz bewahren würden (Gorb *et al.* 2006). Dies war insofern sehr unwahrscheinlich, weil diese Spinnen über Millionen von tarsalen Hafthaaren verfügen, die – ähnlich wie bei den Geckos – eine hervorragende Haftung garantieren. Bei einer genauen Inspektion der publizierten REM-Bilder hatten wir den Verdacht, dass es sich hier nicht um

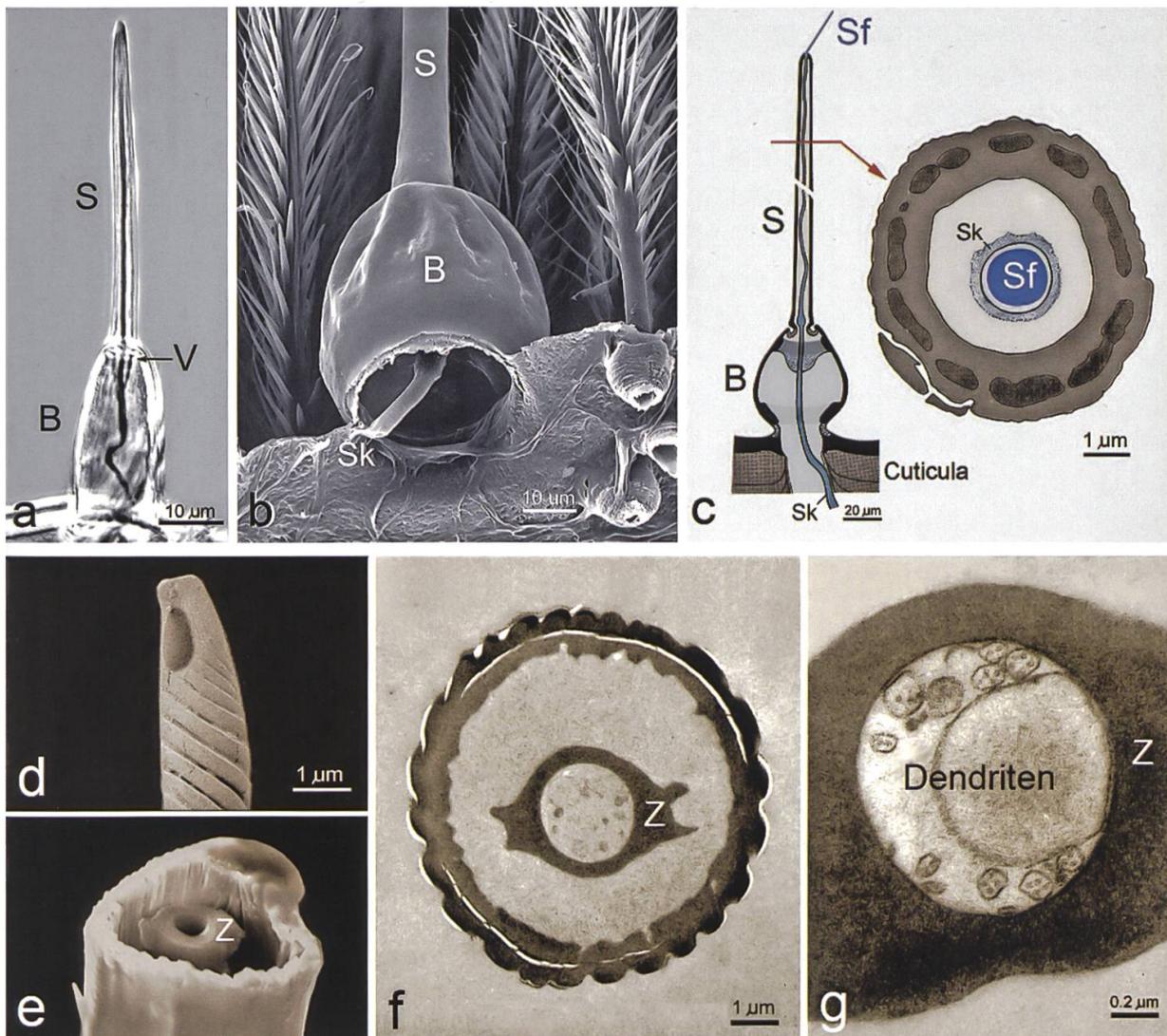


Abb. 34: a–c) Spinnspulen bei Vogelspinnen. a) Spinnspule im Lichtmikroskop: Am Übergang des basalen Bulbus (B) und des distalen Schaftes (S) liegt ein Ventil (V), das die Fadendicke bestimmt. b) Spinnspule im REM: Unten tritt in den Bulbus (B) ein Seidenkanal (Sk) ein, der den Spinnfaden enthält. c) Schema einer Spinnspule im Längs- und Querschnitt. Der Spinnfaden (Sf) durchzieht den Bulbus (B) und tritt am Ende des Schaftes (S) aus. d–g) Geschmackshaar einer Vogelspinne. d) Haarspitze mit seitlicher Pore als Eingang für chemische Reize. Foto: J. Kottsieper. e) Abgebrochener Haarschaft mit Zentralkanal (Z) im Lumen. f) Querschnitt des Haarschafts im TEM, mit Zentralkanal (Z). g) Hohe Vergrößerung des Zentralkanals mit vielen feinen Nervenfasern (Dendriten). Aus Foelix *et al.* 2013.

Spinnspulen handelte, sondern um Geschmackshaare (Kontaktchemorezeptoren). Wir haben deshalb bei einigen Vogelspinnen die echten Spinnspulen auf den Spinnwarzen mit REM und TEM genauer untersucht (Abb. 34a–c) und mit den Geschmackshaaren auf den Tarsen verglichen (Abb. 34d–f). Dabei ergaben sich wesentliche strukturelle Unterschiede: Spinnspulen besitzen an der Basis einen grossen Bulbus und im Inneren einen dünnwandigen Seidenkanal, der den Spinnfaden enthält (Abb. 34c); Geschmackshaare haben einen markant gerippten Haarschaft und im Inneren einen dickwandigen Zentralkanal, der feinste Nervenfasern (chemosen-

sitive Dendriten) enthält. Bei genauer Überprüfung der vermeintlichen tarsalen Spinnspulen (von den Autoren als «*ribbed hairs*» beschrieben) stellte sich heraus, dass es sich hier eindeutig um Geschmackshaare handelte: Die kleine Öffnung nahe der Haarspitze (Abb. 34d) diente nicht als Düse für einen austretenden Spinnfaden, sondern als Eingangspforte für chemische Reize. Das entscheidende Argument war der Nachweis der sensiblen Nervenfasern mit dem TEM bzw. das Fehlen eines homogenen Seidenfadens im zentralen Lumen (Foelix *et al.* 2011, 2012, 2013). Mit dieser Richtigstellung wurde nicht nur die zusätzliche Haftfähigkeit der Spinnentarsen widerlegt, sondern auch weitreichende stammesgeschichtliche Spekulationen, wonach ursprünglich alle Spinnen an allen Extremitäten Spinnfäden produziert hätten.

6.3 Ursprüngliche Spinnen ohne Giftdrüsen?

In einer neueren Monographie über die ursprünglichste Spinne (*Liphistius*) wurde behauptet, dass dort noch keine Giftdrüsen ausgebildet seien. Als Argument wurde angeführt, dass die Chelicerenklauen (s. Abb. 14a) keine Öffnung für den Austritt des Giftes besäßen (Haupt 2003). Allerdings gibt es ältere Arbeiten, in denen Giftdrüsen bei *Liphistius* beschrieben und auch abgebildet wurden. Wer hat nun Recht? In Zusammenarbeit mit dem Musée d'Histoire Naturelle in Genf (Dr. P. Schwendinger) konnten wir neun verschiedene Arten von *Liphistius* unter die «Lupe» (REM) nehmen und fanden in allen Chelicerenklauen eine kleine Giftöffnung. Zugegeben, diese Giftöffnung ist wegen ihrer geringen Grösse und versteckten Lage leicht zu übersehen. Nachdem wir auch die Giftdrüse lokalisieren konnten (genau dort, wo sie vor über 80 Jahren beschrieben wurde), waren die «alten» Anatomen wieder rehabilitiert. Leider hat sich inzwischen in der neuen Literatur die Angabe von Haupt (2003) ziemlich etabliert und es wird wohl Jahre dauern, bis dieser Fehler wieder ausgemerzt ist. Das Problem bei solchen Flüchtigkeitsfehlern liegt darin, dass damit auch weitreichende stammesgeschichtliche Schlüsse gezogen werden, z. B., dass die Giftdrüsen erst bei den höheren Spinnen entstanden seien. Wir konnten in unserer Arbeit zeigen, dass (fast) alle Spinnen Giftdrüsen besitzen, auch die altertümliche *Liphistius* (Foelix & Erb 2010). Die einzige Ausnahme betrifft die Spinnenfamilie Uloboridae, wo Giftdrüsen tatsächlich fehlen, vermutlich wurden sie dort sekundär zurückgebildet. Mehr dazu im Folgenden.

6.4 Spinnen ohne Giftdrüsen: Wie können sie ihre Beute verdauen?

Wenn eine Spinne keine Giftdrüsen besitzt, kann sie ihre Beute auch nicht mit einem Giftbiss lähmen. Stattdessen wickeln die Vertreter der Kräuselradnetzspinnen (Uloboridae) ihre Opfer lange und fest mit Spinnfäden ein – es wird vermutet, dass der Tod durch Ersticken eintritt. Beim Einwickeln wird die Beute zwar ziemlich komprimiert, bleibt aber ansonsten völlig intakt. Das eingesponnene Opfer wird dann mit Verdauungssaft «eingespeichelt» und danach saugt die Spinne das Beutepaket stundenlang aus. Da beim Beutefang die Chelicerenklauen nie eingesetzt werden, gibt es auch keine Öffnungen im Opfer, durch die der Verdauungssaft ins

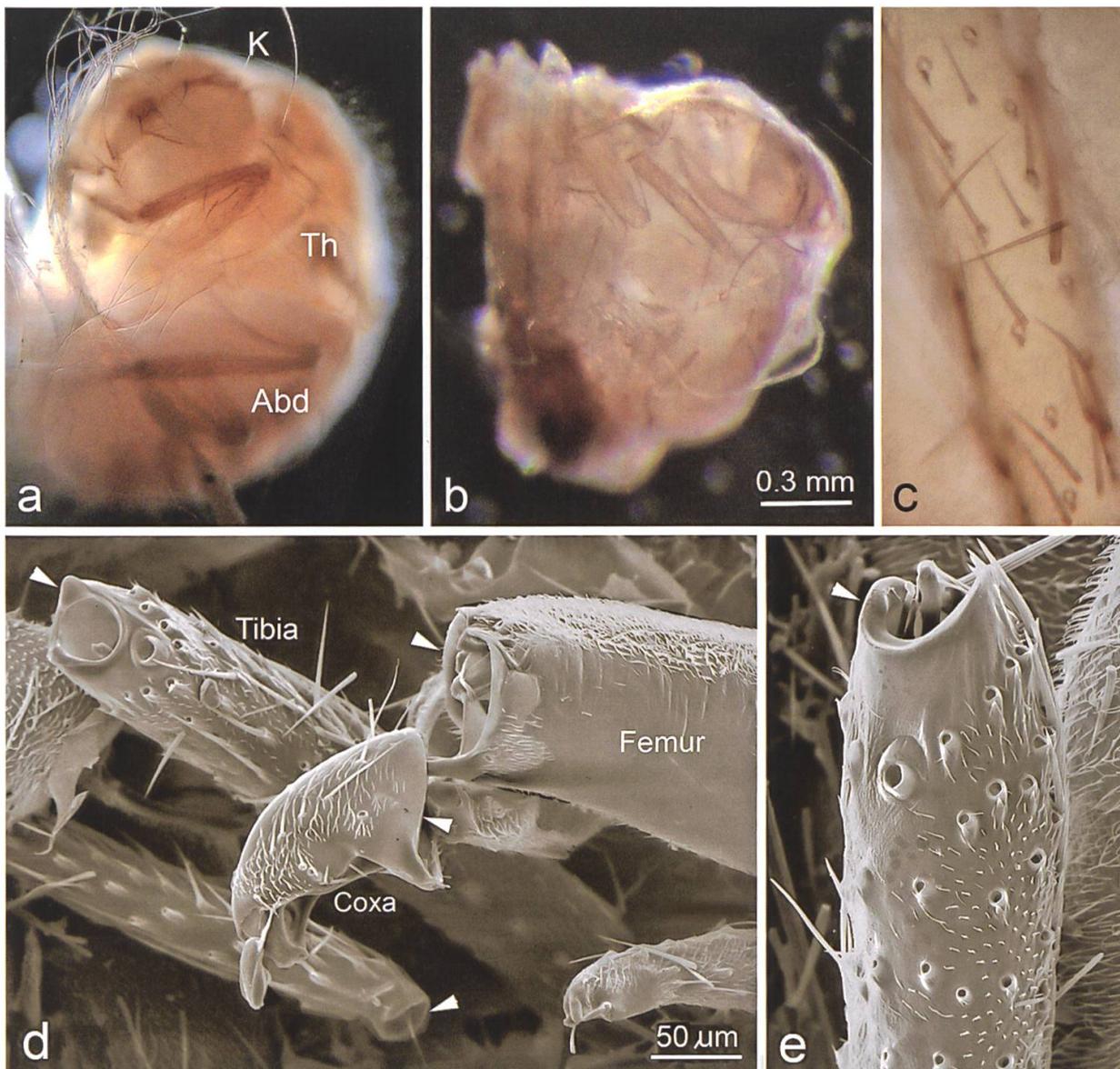


Abb. 35: Beutefang und Verdauung bei der Spinne *Uloborus*. a) Frisch eingewickelte Fruchtfliege im Durchlicht. Kopf (K), Thorax (Th) und Abdomen (Abd) sind zwar komprimiert, aber noch völlig intakt. b) Einige Stunden später – nach der Verdauung – sind nur noch einzelne Körpersegmente erkennbar. c) Ein Beinsegment aus b) zeigt, dass die meisten Haare aus ihren Sockeln herausgelöst wurden. d) Im verdauten Beutepaket wird deutlich, dass alle Gelenkmembranen enzymatisch aufgelöst wurden (Pfeilspitzen), so dass jedes Bein in seine Segmente zerfällt. e) Einzelnes Beinsegment mit aufgelöster Gelenkmembran (Pfeilspitze) und leeren Haarsokkeln (aus Foelix *et al.* 2015).

Körperinnere eintreten könnte. Es stellt sich also die Frage: Wie kann die Beute überhaupt verdaut werden? Angeblich bleiben z. B. Fliegen auch nach dem Aus-saugen äusserlich unversehrt (Peters 1982). Um dieses Problem aufzuklären, haben wir frisch eingewickelte Beutepakete mit weggeworfenen, ausgesaugten Paketen verglichen. Öffnet man frisch eingewickelte Pakete (1 mm Durchmesser) ganz vorsichtig mit winzigen Scherchen, so sind z. B. Fliegen in der Tat völlig intakt (Abb. 35a). Anders sieht es dagegen in verdauten Beutepaketen aus: Dort sind die meis-

ten Körperteile voneinander getrennt (Abb. 35b) – im REM bietet sich ein Bild wie auf einem Autofriedhof (Abb. 35d), wobei z. B. die Beine in ihre einzelnen Segmente (Femur, Tibia etc.) zerlegt sind. Dabei fällt auf, dass alle Gelenke an den Verbindungsstellen zerstört wurden, und fast alle Borsten und Sinneshaare sind aus ihren Sockeln herausgelöst (Abb. 35c, e). Die naheliegende Erklärung ist die: Die Verdauungsenzyme greifen an den weichen Membranen der Gelenke und der Haare an, so dass das feste Aussenskelett allmählich durchlöchert wird und somit für die Verdauung der inneren Weichteile zugänglich wird. Wie effektiv diese Enzyme arbeiten, wird daran ersichtlich, dass alle Cuticulateile nach der Verdauung keinerlei Gewebereste mehr enthalten. Insgesamt konnten wir mit diesen Untersuchungen erstmals klar nachweisen, dass Spinnen ohne Giftdrüsen ihre Beute enzymatisch über die Gelenkmembranen aufschliessen und danach verdauen können (Foelix *et al.* 2015).

7. Fazit

Wir hoffen mit diesem summarischen Überblick gezeigt zu haben, dass auch alte, ausgediente Elektronenmikroskope durchaus nutzbringend an höheren Schulen eingesetzt werden können. Im eigentlichen Schulbetrieb gilt dies vor allem für Demonstrationen in Biologiepraktika oder im Schwerpunktfach, aber auch für selbständige Arbeiten der Schüler/innen im Rahmen von Diplom- oder Maturarbeiten. Je nach persönlichem Engagement können die Betreuer aber auch eigene Forschungsprojekte umsetzen, die oft auch neue Beiträge für die Wissenschaft repräsentieren und in entsprechenden Fachzeitschriften publiziert werden. Insgesamt haben wir in den 25 Jahren Elektronenmikroskopie an der Neuen Kantonschule Aarau ein breites Spektrum vor allem von biologischen und paläontologischen Objekten untersucht; die Ergebnisse (z. B. über 20 000 REM-Bilder) sind archiviert und in der Fachschaft Biologie jedermann zugänglich. Da wir in all den Jahren praktisch keinerlei Ausfälle oder kostspielige Reparaturen hatten, besteht die berechtigte Hoffnung, dass unsere alten Elektronenmikroskope auch weiterhin ein *Highlight* an der NKSA sein werden (Abb. 36).

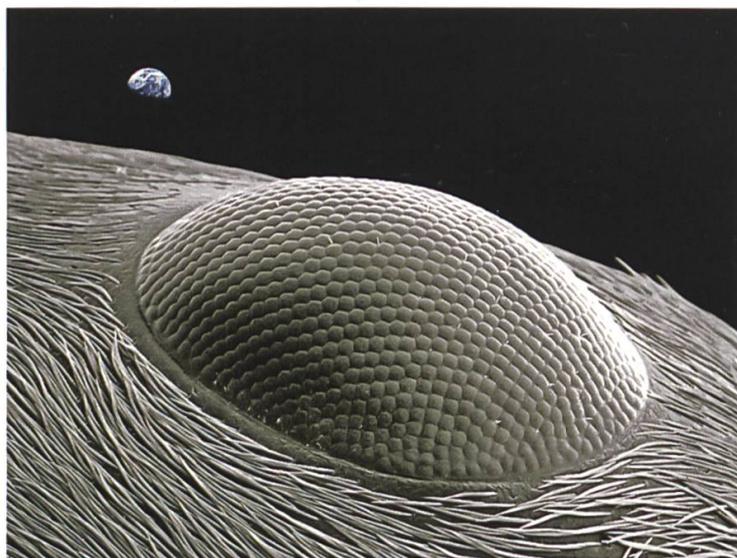


Abb. 36: Makrokosmos trifft Mikroskosmos.

Literatur

- BRUSCA, R. C. & BRUSCA, G. J. (2003): Invertebrates. Sinauer Associates Inc., Sunderland (Ma).
- FOELIX, R. F. (2011): Biology of Spiders. 3rd ed., Oxford Univ. Press, New York
- FOELIX, R. F. (2012): Antennen-Putzapparat. Schweizerische Bienenzeitung 2012 (10): 20–21
- FOELIX, R. F. (2015): Biologie der Spinnen. 3. Aufl., Chimaira Verlag, Frankfurt/M.
- FOELIX, R. & ERB, B. (2010): Mesothelae have venom glands. *J. Arachnol.* 38: 596–598
- FOELIX, R. & ERB, B. (2011): Strukturhaltung fossiler Kieselhölzer: Mammutbaum (Eozän) und Araukarie (Keuper). *Schweizer Strahler* 45 (4): 25–32
- FOELIX, R. & ERB, B. (2012): Der Pollensammelapparat. Schweizerische Bienenzeitung 2012 (11) 28–29
- FOELIX, R. & ERB, B. (2013): Der Bienenstachel. Schweizerische Bienenzeitung 2013 (1) 36–37
- FOELIX, R. & ERB, B. (2014A): Pollen unter dem Mikroskop. *ANG Fokus* 2/2014: 34–42
- FOELIX, R. & ERB, B. (2014B): «Wegwerf-Linsen» in den Augen des Pfeilschwanzkrebses *Limulus*. *Arachne* 19 (3): 22–27
- FOELIX, R., ERB, B. & RAST, B. (2013): Alleged silk spigots on tarantula feet: Electron microscopy reveals sensory innervation, no silk. *Arthr. Struct. Dev.* 42: 209–217
- FOELIX, R., ERB, B. & STÖCKLI, B. (2012): Schillerfarben in Pflanzen. *ANG Bulletin* 2/2012: 13–19
- FOELIX, R., RAST, B. & ERB, B. (2009): Palpal urticating hairs in the tarantula *Epebopus*: fine structure and mechanism of release. *J. Arachnol.* 37: 292–298
- FOELIX, R. F., RAST, B. & PEATTIE, A. M. (2012): Silk secretion from tarantula feet revisited: alleged spigots are probably chemoreceptors. *J. Exp. Biol.* 215: 1084–1089
- FOELIX, R., ERB, B. & WULLSCHLEGER, B. (2005): Scheren und Cheliceren – natürliche Werkzeuge bei Krebsen und Spinnentieren. *Mitteilg. Aarg. Naturf. Ges.* 36: 159–176
- FOELIX, R., ERB, B. & BRAUNWALDER, M. (2014): Fine structure of the stinger (aculeus) in *Euscorpius*. *J. Arachnol.* 42: 119–122
- FOELIX, R., ERB, B. & WULLSCHLEGER, B. (2009): Worauf beruht die Blaufärbung gewisser Vogelspinnenarten? *Arachne* 14(3): 4–12
- FOELIX, R. F., ERB, B. & HILL, D. E. (2013): Structural colors in spiders. In: *Spider Ecophysiology* (ed. W. Nentwig), Springer Verlag Berlin, pp. 333–346
- FOELIX, R., RAST, B., ERB, B. & WULLSCHLEGER, B. (2011): Spinnspulen auf den Tarsen von Vogelspinnen? Eine Gegendarstellung. *Arachne* 16(4): 4–9
- FOELIX, R., RAST, B., ERB, B. & THIELECZEK, R. (2012): Zur blauen und gelben Färbung von *Poecilotheria metallica* (Pocock, 1899). *Arachne* 17(3): 4–9
- FOELIX, R., JOEL, A.-C. & ERB, B. (2015): Wie die Kräuselradnetzspinne *Uloborus* ihre Beute einwickelt und verdaut. *Arachne* 20 (in Druck)
- FOELIX, R. F. & KAUFMANN, P. (1992): Die Putzrinne am Bienenbein im REM. *Mikrokosmos* 81(5): 134
- FOELIX, R. F. & KAUFMANN, P. (1995): Coccolithen – oder Plankton im Nanobereich. 123. Jahresbericht der Neuen Kantonsschule Aarau: 94–98
- FOELIX, R., KAUFMANN, P. & RIOU, B. (1992): Fossile Kieselalgen im Rasterelektronen-Mikroskop. *Mikrokosmos* 81(7): 199–202
- GORB, S. N., NIEDEREGGER, S., HAYASHI, C. Y., SUMMERS, A. P., VÖTSCH, W. & WALTHER, P. (2006): Biomaterials: Silk-like secretions from tarantula feet. *Nature* 443: 407
- HALDIMANN, K. (2011): Koprolithen und andere Spurenfossilien aus Frick. *Schweizer Strahler* 45 (1): 19–26
- HAUPT, J. (2003): The Mesothelae – a monograph of an exceptional group of spiders (Araneae: Mesothelae). *Zoologica* 154:1–102

- MÜLLER, P. & OSWALD, B. (2001): Pollen unter dem REM – kleine Welt ganz gross. Maturaarbeit an der Aargauischen Maturitätsschule für Erwachsene (AME)
- PETERS, H. M. (1982): Wie Spinnen der Familie Uloboridae ihre Beute einspinnen und verzehren. Verh. Naturwiss. Ver. Hamburg 25: 147–167
- SCHMUZIGER, Y. & WELSCH, S. (2010): Leben nach dem Tod. Die Besiedlung von Kadavern durch Bakterien. Maturaarbeit an der Neuen Kantonsschule Aarau.
- WEHNER, R. & GEHRING, W. (2013): Zoologie. 25. Aufl., Thieme Verlag Stuttgart

Dank

Für die Benutzung der Elektronenmikroskope sind wir der Neuen Kantonsschule Aarau zu grossem Dank verpflichtet, ebenso für deren technische Betreuung durch Dieter Ertinger und Jan de Vries.

Adressen der Autoren:

Dr. Rainer F. Foelix
Schanzmättelstr. 15
5000 Aarau

Bruno Erb
Kilbigstr. 15
5018 Erlinsbach

Dr. Benno Wullschleger
Neue Kantonsschule Aarau
Schanzmättelstr. 32
5000 Aarau