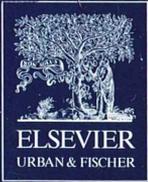


II 90372/96,2



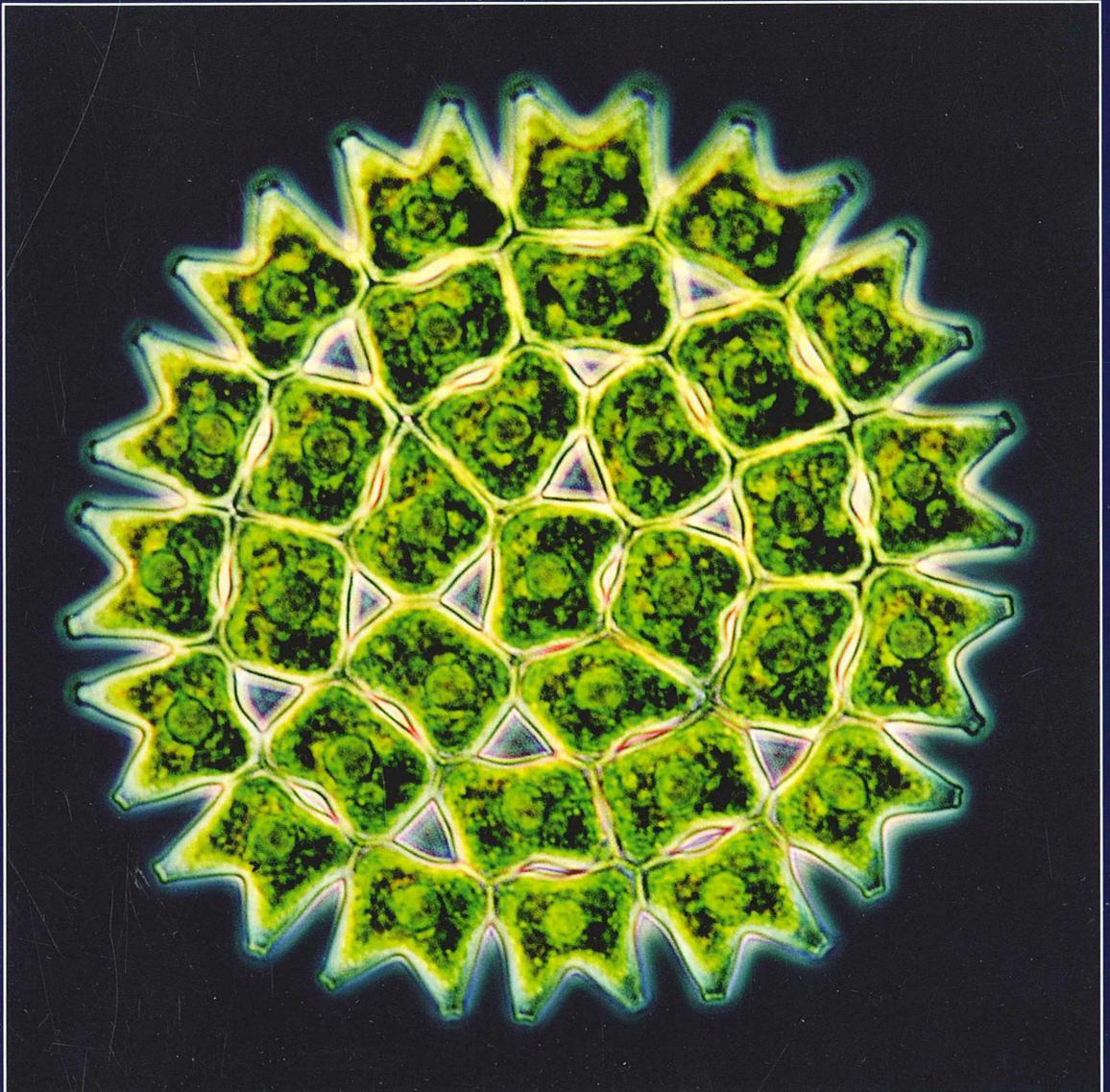
# MIKROKOSMOS



Heft 2  
96. Jahrgang  
März 2007

◆ [www.elsevier.de/mikrokosmos](http://www.elsevier.de/mikrokosmos)

ISSN 0026-3680



Mitteilungsorgan für den Arbeitskreis Mikroskopie im Freundeskreis Botanischer Garten Köln, Arbeitskreis Mikroskopie im Naturwissenschaftlichen Verein zu Bremen, Berliner Mikroskopische Gesellschaft e.V., Deutsche Mikrobiologische Gesellschaft Stuttgart, Mikrobiologische Vereinigung im Naturwissenschaftlichen Verein zu Hamburg, Mikrobiologische Vereinigung München, Mikroskopische Gesellschaft Wien, Mikroskopische Arbeitsgemeinschaft der Naturwissenschaftlichen Vereinigung Hagen e.V., Mikroskopische Arbeitsgemeinschaft Hannover, Mikroskopische Arbeitsgemeinschaft Mainfranken, Mikroskopische Arbeitsgemeinschaft Stuttgart, Mikroskopische Gesellschaft Zürich, Tübinger Mikroskopische Gesellschaft e.V.

## Inhalt

### Artikel

- 65** Der Blütenstand des Aronstabs – Osmophor und Kesselfalle mit Kamin  
*Eberhard Schnepf*
- 75** Ein Moos fängt Tiere – Zoophagie bei *Pleurozia purpurea*  
Teil 2: Untersuchungen in der Natur  
*Sebastian Hess*
- 83** Ein besonderer Winteraspekt: Ruderfußkrebse (Copepoden) als Laubbewohner in bodenfeuchten Niederungswäldern  
*Gunnar Gad*
- 101** Dias mit der digitalen Kamera abfotografieren – Selbstbau einer „digitalen Lichtbox“  
*Hans-Jürgen Steinkohl*
- 105** Zellen und Strukturen mit berühmten Namen  
Teil 3: Langerhans-Inseln  
*Bernd Walz*
- 111** Technische Realisation digitaler Mikrofotografie mit handelsüblichen Consumer-Digitalkameras. Teil 1: Allgemeine Aspekte, Verwendung von Kompakt- und Bridgekameras  
*Jörg Piper*

### Rubriken

- 81, 103**  
Kurze Mitteilungen
- 124**  
Buchbesprechungen
- 74, 80, 100, 110**  
Nachrichten
- 100**  
Neue Medien
- 109**  
Mikro-Lyrik
- 126**  
Aus den  
Arbeitsgemeinschaften
- 127**  
Mikro-Markt

Im elektronischen MIKROKOSMOS-ARCHIV [www.elsevier.de/mikrokosmos](http://www.elsevier.de/mikrokosmos) werden mit Erscheinen dieses Heftes zwei Artikel über die wichtigsten Kleinlebewesen stehender Gewässer sowie über Aufwuchslebensgemeinschaften aus dem Band 62 (1973) wiedergegeben.

Das jeweils neueste Inhaltsverzeichnis können Sie jetzt auch kostenlos per e-mail (ToC Alert Service) erhalten.  
Melden Sie sich an: [www.elsevier.de/mikrokosmos](http://www.elsevier.de/mikrokosmos)

**Indexed in:** Bibliography and Index of Geology (also known as GeoRef)/Biological Abstracts/Chemical Abstracts/Excerpta Medica/Scopus/Zoological Records

Mehr Informationen zum MIKROKOSMOS und anderen Zeitschriften finden Sie im Internet:  
[www.elsevier.de](http://www.elsevier.de)

*Umschlagabbildung:* Die Zieralge *Pediastrum duplex* im Phasenkontrast.  
Siehe Artikel H. J. Steinkohl, S. 101–103.

# Der Blütenstand des Aronstabs – Osmophor und Kesselfalle mit Kamin

Eberhard Schnepf

Der Gefleckte Aronstab, *Arum maculatum*, andere *Arum*-Arten und einige weitere Aronstabgewächse (Araceae) haben eine außergewöhnliche Blütenbiologie. Insekten werden durch einen intensiven Geruch (Gestank!) angelockt, der von einer Duftdrüse, einem Osmophor, abgegeben wird. Sie werden dann vorübergehend in einer Kesselfalle gefangen gesetzt. Das ist mit entwicklungsphysiologischen, stoffwechselphysiologischen und histologischen Besonderheiten verbunden. Zu den Letzteren gehört eine so genannte Lückenepidermis, eine Epidermis mit nach außen offenen Interzellularen, die nicht von Schließzellen umrandet sind. Lückenepidermen kommen nur sehr selten im Pflanzenreich vor. Sie helfen beim Aronstab, die Kesselfalle kaminartig zu durchlüften, was von früheren Autoren oft nicht oder nicht richtig beschrieben und gedeutet worden ist. Der Osmophor, die Lückenepidermis und andere interessante, mikroskopisch leicht zu beobachtende Strukturen werden in diesem Artikel nach einem Überblick über die Morphologie, Physiologie und Blütenbiologie des Aronstab-Blütenstandes vorgestellt und diskutiert.

Der Aronstab war schon einmal Thema eines Artikels im MIKROKOSMOS (Krause und Werthmüller, 1991). Die Autoren arbeiteten damals mit sehr aufwändigen Methoden (Einbettung in Kunstharz, Mikrotom-Dünnschnitte, Rasterelektronenmikroskopie). Mit Handschnitten durch Lebendmaterial und einfachen Färbungen mit Lugol-Lösung oder Karminessigsäure und Aufhellung mit 95% Phenol (Vorsicht, Phenol ist Haut ätzend!) kann man oft dieselben oder sogar noch bessere Informationen bekommen.

## Morphologie und Blütenbiologie

Der Gefleckte Aronstab ist häufig anzutreffen, vor allem in feuchten Buchenmischwäldern. Seine Gleitfallenblumen und ihre Blütenbiologie sind mehrfach beschrieben, beispielsweise von Knoll (1956), Lüttge et al. (1994) und Kadereit (2002). Ältere Publikationen über ihre Histologie gibt es außer von Krause und Werthmüller (1991) unter anderem von Knoll (1923) und von Schulte (1969). Neuer und sehr informativ ist ein Aufsatz von Bermadinger-Stabentheiner und Stabentheiner (1995).

Der Blütenstand des Aronstabs (Abb. 1) besteht aus einem dicken, kolbigen Schaft (Spadix), der unten einen Gürtel aus weiblichen Blüten trägt. Dieser geht oben in einen Ring aus

Abb. 1–22: *Arum maculatum*, Abb. 23 und 24: *Ceropegia woodii*. Abb. 3, 6–24: Färbungen mit Jod-Jodkali (Lugol) oder Karminessigsäure („KE“), meistens aufgehellt mit Phenol.

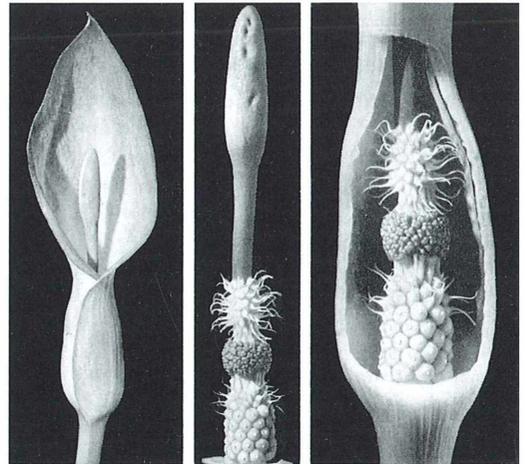


Abb. 1: Blütenstand. Links: Unmittelbar nach dem Öffnen der Spatha, Außenansicht. Mitte: Blütenstand nach dem Wegschneiden der Spatha, in der weiblichen Blühphase. Von oben nach unten: Keule; Keulenstiel; Reuse aus borstigen, sterilen männlichen Blüten; männliche Blüten; borstige, sterile, weibliche Blüten; weibliche Blüten. Rechts: Kessel aufgeschnitten. Aus Knoll (1956).

sterilen Borstenblüten über, dem ein Gürtel aus männlichen Blüten folgt. Der wird oben von einem Ring aus sterilen, zu Borsten umgewandelten Blüten abgeschlossen. Diese Borsten bilden eine Reuse. Der Spadix setzt sich fort in eine Keule (Spadix-Appendix) aus einem dünneren Stiel und einem dickeren Oberteil. Sie ist bräunlich-violett, selten gelblich gefärbt.

Der untere Teil des Kolbens mit den Blüten ist von einem Hochblatt (Spatha) kesselartig umhüllt. Kurz vor der Blühphase öffnet sich die Spatha oben. Ihre Innenseite ist dort grünlich oder rötlich weiß, die Außenseite grünlich gefärbt. Durch die enge Kesselöffnung tritt der Spadix-Appendix aus. Die Passage ist hier durch die Reuse eingeschränkt. Dadurch können keine größeren Insekten in den Kessel gelangen, wohl aber kleinere. Diese, vor allem Kot liebende Dipteren und Käfer, besonders *Psychoda phalaeonides*, werden durch einen Kot-Aas-Urin-Geruch angelockt, der von der Keule emittiert wird. Die Spadix-Appendix ist also eine Duftdrüse, ein Osmophor.

Als Duftstoffe sind Isobutylamin, Äthylamin und Ammoniak nachgewiesen (Steiner und Löffler, 1929). Die Duftabgabe wird dadurch gefördert, dass sich die Keule nach dem Öffnen der Spatha erwärmt. Das wurde bereits von Lamarck entdeckt (1778, zitiert nach Leick, 1915).

Insekten, die durch den Geruch und die Farbe der Keule angelockt werden und sich auf die Spatha oder die Keule niederlassen wollen, finden dort keinen Halt, denn die Epidermen sind glatt beziehungsweise papillös und mit Öl überzogen. Sie rutschen nach unten und kommen in den Kessel, wenn sie klein genug sind, um durch die Reuse zu fallen. Die Kesselwand oben und die Borsten über den weiblichen Blüten sind ebenfalls so glatt, dass die Beine der Insekten dort keinen Halt finden. Herausfliegen können sie auch nicht, da der Weg nach oben zum Licht durch die Reuse versperrt ist. Wenn sie *Arum*-Pollen mitgebracht haben, bestäuben sie die weiblichen Blüten, die jetzt befruchtungsbereit sind.

Die Spatha öffnet sich am späten Vormittag. Vom späten Nachmittag desselben Tages bis in die Nacht hinein duftet die Keule und erwärmt sich. Messungen mit Infrarot-Thermographie von Bermadinger-Stabentheiner und Stabentheiner (1995) haben gezeigt, dass die Oberfläche der Keule 5 bis 14 °C wärmer als die Lufttemperatur werden kann, beim verwandten

*Sauromatum guttatum* sogar bis 22 °C (Diamond, 1980).

Bei *Arum maculatum* bleiben die am Abend gefangenen Insekten die ganze Nacht und den folgenden Tag im Kessel. Sie werden dort durch eine Art von schleimigen Nektar verköstigt: Ein komfortables Gefängnis! Erst in der folgenden Nacht entlassen die männlichen Blüten ihren klebrigen Pollen und beladen damit die Insekten. Eine Selbstbefruchtung wird dadurch verhindert. Anschließend verlieren die Zellen der Kesselwand ihre Turgeszenz, der Ölfilm verschwindet, die Reusenborsten welken. Die Insekten können nun entweichen – und sie lassen sich gern wieder von der nächsten Aronstabpflanze anlocken und gefangen nehmen. Ein Kessel kann dicht mit gefangenen Insekten gefüllt sein. Bald nach der Freilassung der Insekten welkt die Spatha, anfangs nur der obere, freie Teil. Dann wird auch die Keule schrumpelig, kollabiert und stirbt ab.

Der Ablauf dieser Prozesse ist im Detail noch vielschichtiger als soeben geschildert. Hinweise darauf hat schon Leick (1915) entdeckt. Bermadinger-Stabentheiner und Stabentheiner (1995) sowie Skubatz et al. (1990) haben das dann für *Arum maculatum* beziehungsweise für andere Araceen gezeigt. Beim gefleckten Aronstab erwärmen sich die männlichen Blüten am Mittag des Tages vor der Öffnung der Spatha. Eine zweite und dritte Erwärmungsphase setzt hier vor und nach der Erwärmung der Keule ein. Bei allen diesen drei Erwärmungsperioden wird ein fruchtiger Duft freigesetzt, kein Gestank. Die männlichen Blüten werden aber längst nicht so warm wie die Keule und duften nicht so intensiv.

Die Erwärmung der Keule und die Duftemission wird durch Calorigene induziert (Chen und Meeuse, 1975), Phytohormone, die im Bereich der männlichen Blüten gebildet werden, was photoperiodisch gesteuert ist (Schopfer und Brennicke, 2006). Es hat sich dann herausgestellt, dass bei *Sauromatum* und vermutlich auch bei *Arum maculatum* Calorigene identisch ist mit Salizylsäure (Raskin, 1992). Am späten Nachmittag vor dem Tag der Spatha-Öffnung steigt der Salizylsäure-Gehalt in der Keule auf das Hundertfache an (Diamond, 1989). Salizylsäure ist ein sehr ungewöhnliches Phytohormon. Bei den Araceen-Keulen erhöht es ebenso wie Acetylsalizylsäure (Aspirin) die Temperatur. Beim Menschen wird Aspirin bei Fieber zur Senkung der Körpertemperatur verwendet.

Die Erwärmung der Keule fördert die Freisetzung der Duftstoffe. Anders als früher gedacht (Leick, 1915) lockt die Wärme die Insekten aber nicht direkt an (Knoll, 1926). Wie entsteht die Wärme? Durch den Abbau von Stärke und nachfolgende ungewöhnliche Atmungsprozesse. Dabei steigt die Atmungsintensität um das Hundertfache an, und in wenigen Stunden werden 75% des Trockengewichts der Keule regelrecht verheizt. Die frei werdende Redoxenergie wird unter Umgehung der Protonenpumpe in den Mitochondrien und damit der ATP-Bildung durch alternative Oxidasen unmittelbar in Wärme umgewandelt (Lüttge et al., 1994; Schopfer und Brennicke, 2006). Dieser Prozess ist nicht wie die normale Atmung durch Cyanid oder Kohlenmonoxid hemmbar (Meeuse, 1975). Der Stärkeabbau im Osmophor lässt sich leicht mikroskopisch demonstrieren.

### **Mikroskopische Beobachtungen am Osmophor**

Die Keule besteht aus einem Zentralzylinder und einer dicken Schicht aus Rindenparenchym, die von der Epidermis bedeckt ist (Schulte, 1969). Es gibt weder in der Rinde noch im Zentralzylinder nennenswertes kollenchymatisches oder sklerenchymatisches Festigungsgewebe. Die zentralen Hauptbündel sind von Stärkescheiden umgeben und liegen in einem aerenchymartigen Grundgewebe mit weiten, Luft gefüllten Lakunen. Die Aerenchymzellen sind relativ groß, plasma- und stärkearm und haben oft relativ kleine, kompakte Zellkerne (Abb. 9). Von den zentralen Leitbündeln treten Abzweigungen in das Rindenparenchym. Die Stärke wird in den Rindenparenchymzellen gespeichert. Diese sind mehr oder weniger isodiametrisch und dünnwandig. Sie liegen in radialen Reihen, die durch lange Interzellulargänge voneinander abgegrenzt sind (Abb. 2). Die Plastiden sind frei von Chlorophyll, enthalten aber Carotinoide (Schnepf und Czygan, 1966), wodurch das Kolbenparenchym gelblich gefärbt ist. Die Rindenparenchymzellen sind dicht mit diesen Amylochromoplasten vollgepackt (Abb. 3), die jeweils mehrere Stärkekörner enthalten, so dass man von zusammengesetzten Stärkekörnern sprechen kann. Diese fallen aber leicht auseinander, wenn sie aus den Zellen herausgespült werden. Die Einzelkörner sind rundlich-polyedrisch (Abb. 4).

Die Stärke wird in wenigen Stunden fast vollständig abgebaut. Wenn man die Körner während dieser Zeit herauspült, stellt man fest, dass beim Fortschreiten des Abbaues zwar weniger Körner frei werden, diese aber nicht viel kleiner sind (Abb. 5) als vor der Thermogenese. Das hängt mit einer Besonderheit dieses Abbaues zusammen, die schon Haberlandt (1924) beschreibt. Er beginnt in der Peripherie der Keule (Abb. 8), schreitet aber im Inneren nicht von der Spitze zur Basis oder umgekehrt fort, sondern ist ganz unregelmäßig. Das sieht man schon makroskopisch an Querschnitten, die mit Lugol-Lösung gefärbt sind. Im Mikroskop erkennt man, dass die Stärke sogar in benachbarten Zellen ganz unterschiedlich weit abgebaut sein kann (Abb. 6 und 7). Die peripheren Lagen der Keule gehen dabei meistens voraus (Abb. 8). Die Abbildungen 6, 7 und 8 stammen von derselben Keule. Die einzelnen Zellen arbeiten also ziemlich unabhängig voneinander. Wenn nach der Blüte die Keule schlaff wird und schließlich vertrocknet, entleeren sich zuerst die inneren Rindenparenchymzellen völlig und kollabieren. Die peripheren Bereiche der Rinde bleiben länger am Leben, ebenso wie die Zellen in der Nähe der Leitbündel. Diese enthalten noch relativ lange Stärkereste.

Die Zellkerne der Rindenparenchymzellen sind relativ groß, viel größer als Kerne in manchen Zellen des inneren Aerenchymys (Abb. 9). Ihr Durchmesser schwankt sehr, von 13 bis 22 µm (Mittelwert 16,4 µm). Nach der Thermogenese sind sie etwas kleiner (Mittelwert 13,4 µm). Sie sind wie die Kerne der Epidermiszellen und Hypodermiszellen stark heterochromatisch (Abb. 10 und 11). Ihre Struktur ist besonders gut zu erkennen, wenn die Stärke abgebaut ist. Nukleolen sind dann nicht zu finden. Vorher werden die Kerne durch die verquellende Stärke regelrecht zerquetscht, wenn das Gewebe mit Karminessigsäure fixiert und gefärbt wird. In Zellen, die beim Schneiden mit der Rasierklinge verletzt wurden, kann das Chromatin dann als fädige Masse heraustreten.

Im oberen, dicken Teil der Keule, nicht im Keulenstiel, besteht die Epidermis aus papillösen Zellen (Abb. 8, 11, 12), die fünf- bis sieben-eckig aneinander grenzen. Sie sind bei violett gefärbten Keulen anthocyanhaltig und speichern Stärke wie die Rindenparenchymzellen (Abb. 12). Durch die Papillen wird die Oberfläche der Epidermis beträchtlich vergrößert. Das hilft sicher, die Duftstoffe frei zu setzen. Außer-

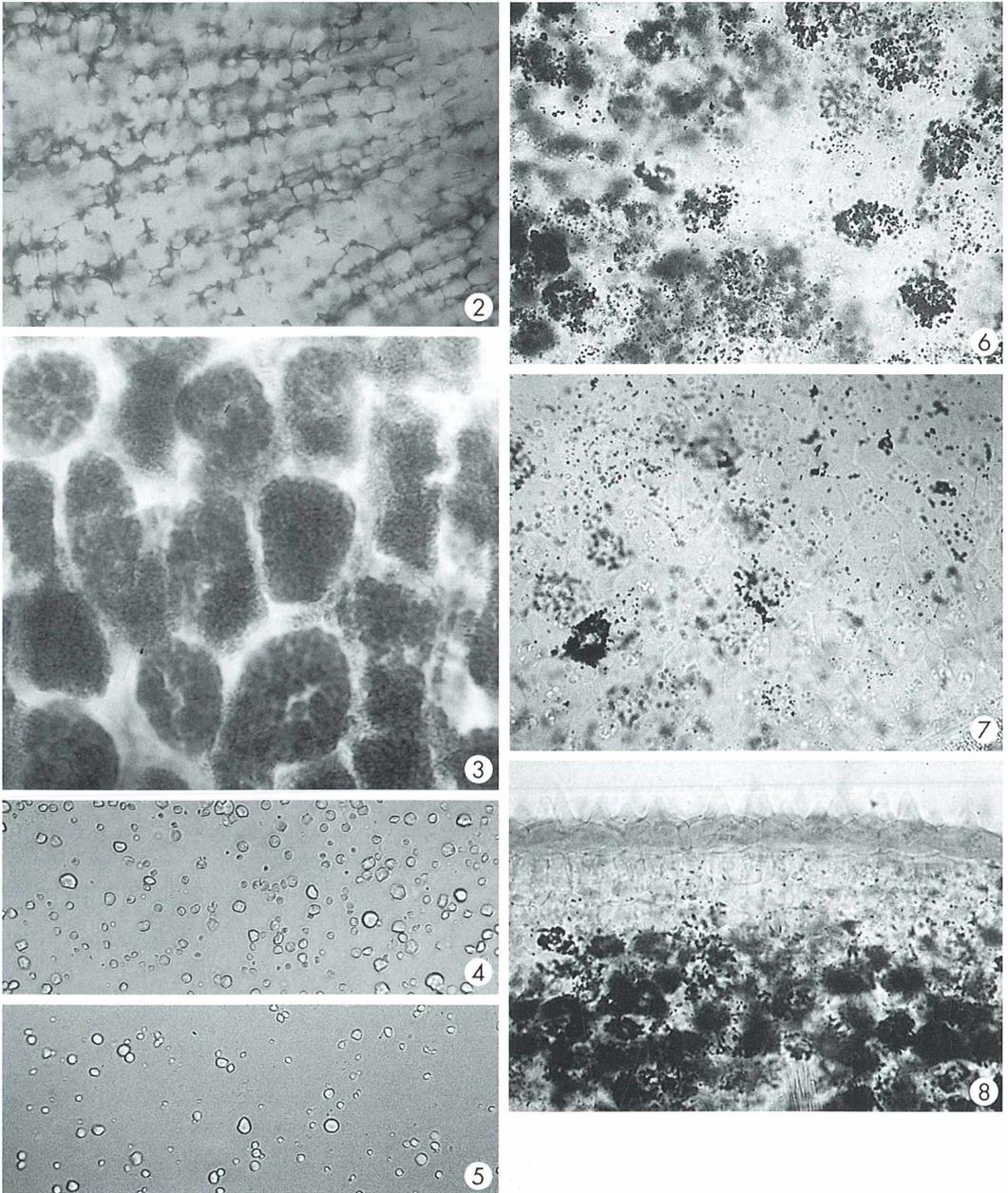


Abb. 2: Keule kurz nach der Thermogenese, Querschnitt. Rindenparenchym mit radial verlaufenden Interzellularen. Vergr. 120fach. – Abb. 3: Keule kurz vor der Thermogenese. Rindenparenchymzellen mit Stärke gefüllt. KE; Vergr. 470fach. – Abb. 4: Keule kurz vor der Thermogenese. Herausgespülte Stärke. Ungefärbt; 370fach. – Abb. 5: Keule am Ende der Thermogenese. Herausgespülte Stärke. Ungefärbt; 370fach. – Abb. 6–8: Unterschiedlich fortgeschrittener Stärkeabbau in den Zellen derselben Keule bei der Thermogenese. Lugol. Abb. 6 und 7: Rindenparenchym im Inneren der Keule. Vergr. 180fach. Abb. 8: Die Stärke ist in der Epidermis, der Hypodermis und in den äußeren Rindenparenchymzellen nahezu vollständig abgebaut, weiter innen noch nicht. Vergr. 170fach.

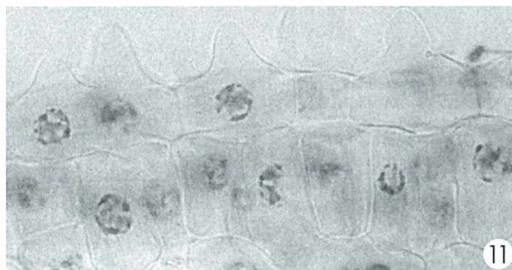
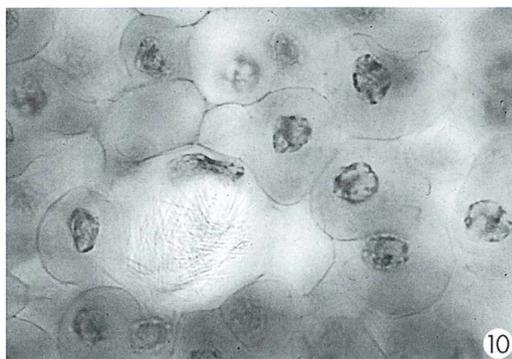
dem erschweren die Papillen, dass sich die angelockten Insekten auf der Keule festsetzen. Den Übergang zwischen Epidermis und Rindenparenchym bildet die Hypodermis, eine Lage von zylindrischen Zellen (Abb. 11), zwischen denen nur kleine Interzellularen sind.

In der Epidermis gibt es nur sehr wenige Spaltöffnungen, im oberen Teil der Keule etwa 6–8 pro mm<sup>2</sup>, im Keulenschaft etwa 1–4 pro mm<sup>2</sup>. Das Schließzellenpaar ist etwas eingesenkt und bildet in Aufsicht fast einen Kreis (Abb. 13). Ihre Kerne sind rundlich-eiförmig (Abb. 14). Die Schließzellen enthalten etwas Chlorophyll (Schulte, 1969) und viel Stärke, auch dann noch, wenn diese im Rindenparenchym veratmet ist. Die Nebenzellen sind nicht papillös und oft frei von Anthocyan. Unter dem Öffnungsspalt gibt es eine Atemhöhle (vergl. weiter unten).

Schulte (1969) hält den Spaltöffnungs-Apparat der Keule für nicht voll funktionstüchtig. Dem ist zuzustimmen. Die Schließzellen sehen in den Laubblättern des Aronstabes und an der Außenseite des Kessels anders aus, in Aufsicht nicht kreisförmig rundlich, sondern fast doppelt so lang wie breit (Abb. 15 und 20), und die Kerne sind spitz spindelförmig (Abb. 16).

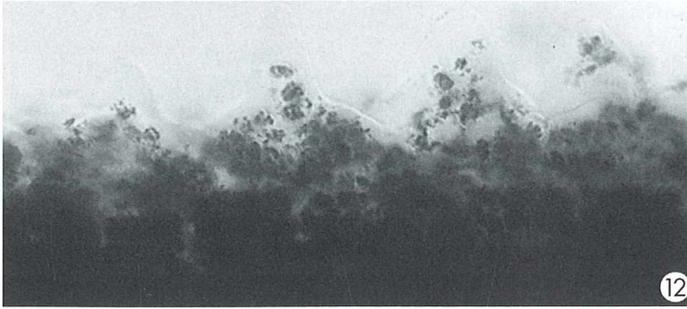
Es ist keine Fehlleistung der Natur, bei einer extrem hohen Atmungsintensität so wenige Spaltöffnungen zu entwickeln. Die Konzentration des Sauerstoffs in der Luft ist 21%, die des Kohlendioxids 0,03% bis 0,04%. Am Ort ihres Verbrauches ist die Konzentration beider Gase nahezu Null. Beim Sauerstoff ist der Konzentrationsunterschied zwischen innen und außen, also im stark atmenden Kolben sehr groß. Sauerstoff dringt deshalb per Diffusion leicht in die Keule ein. Für Kohlendioxid ist der Konzentrationsunterschied zwischen innen, wo es gebildet wird, und außen ebenfalls sehr groß. Die Diffusion von innen nach außen wird dadurch stark angetrieben. Für diese Diffusionsprozesse sind Spaltöffnungen nicht nötig. Spaltöffnungen (und damit Atemhöhlen) dienen der Photosynthese, nicht der Atmung.

Außer den bereits beschriebenen Zelltypen gibt es in der Keule noch zwei Arten von Idioblasten, Sekretzellen in der Nähe der Leitbündel und Raphidenzellen im Rindenparenchym. Die Sekretzellen (Schulte, 1969) sind erst nach einer Jodfärbung gut zu erkennen (Abb. 17). Sie haben dann (nach Aufhellung mit Phenol) einen bräunlichen, körnig-kugeligen Inhalt. Sie speichern wie die Raphidenzellen keine Stärke.

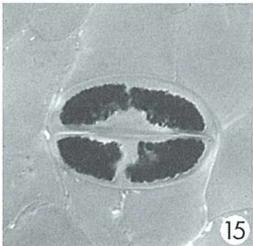
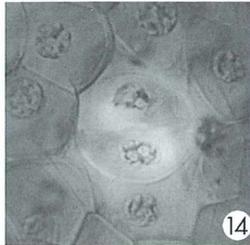
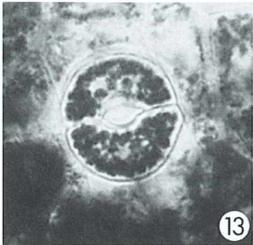


**Abb. 9:** Keule nach der Thermogenese. Die Zellkerne im inneren Aerenchym (rechts) sind kleiner und kompakter als der Zellkern in der Stärke speichernden Rindenparenchymzelle (links). KE; Vergr. 400fach. – **Abb. 10:** Keule kurz nach der Thermogenese. Rindenparenchymzellen mit großen, stark heterochromatischen Zellkernen. In der Bildmitte ein Raphiden-Idioblast. KE; Vergr. 400fach. – **Abb. 11:** Keule kurz nach der Thermogenese. Epidermis und Hypodermis mit großen, stark heterochromatischen Zellkernen. KE; Vergr. 400fach.

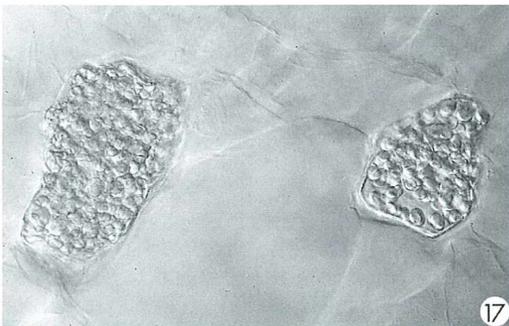
Die Raphidenzellen sind in der Keule meist nur wenig größer als die Stärke speichernden Rindenparenchymzellen (Abb. 10). Ihre Kerne sind gleichfalls nicht viel größer als die im Rindenparenchym. Das ist bei den Raphidenzellen in der Spatha, im Blatt, im Blattstiel und vor allem im Perikarp der Beeren, wo sie sehr häufig sind,



**Abb. 12: Keule kurz vor der Thermogenese. Epidermiszellen und ihre Papillen dicht mit Stärke gefüllt. Lugol; Vergr. 410fach.**



**Abb. 13: Keule kurz vor der Thermogenese. Rundliches Schließzellpaar. Lugol; Vergr. 530fach. – Abb. 14: Keule kurz nach der Thermogenese. Rundliches Schließzellpaar mit rundlichen Zellkernen. KE; Vergr. 530fach. – Abb. 15: Blatt. Längliches Schließzellpaar. Lugol; Vergr. 400fach. – Abb. 16: Blatt. Längliches Schließzellpaar mit spindelförmigen Kernen. KE; Vergr. 400fach.**



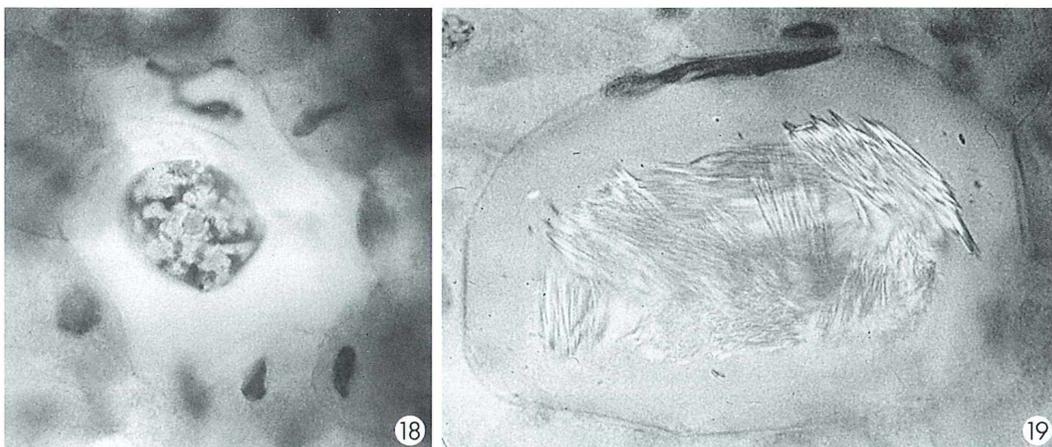
**Abb. 17: Kolben nach der Thermogenese. Sekretidioblast. Lugol; Vergr. 350fach.**

anders. Im Blattstiel sind die Raphidenzellen meist lang schlauchförmig, im Perikarp junger Beeren groß und rundlich eiförmig. Ihre Kerne sind außergewöhnlich groß (Abb. 18) und haben deutlich erkennbare Nukleolen. Oft sind sie linsenförmig abgeplattet und erscheinen darum in Profilansicht vielfach sehr dunkel (Abb. 19). Sie sind sicher durch Endomitosen hoch polyploid geworden.

### **Mikroskopische Beobachtungen an der Spatha und ihrem Kaminsystem**

Die Spatha des Aronstabes besteht aus einem unteren Teil, der die Wand des Fangkessels bildet, und aus einem freien, oberen Teil. Dieser welkt nach der Blüte sehr schnell, stirbt und fällt ab. Die Kesselwand lebt etwas länger, trocknet dann aber auch bald ein und umhüllt dann noch für einige Wochen den sich entwickelnden Fruchtstand. In den toten Zellen der Spatha gibt es wie auch in alternden Zellen der Laubblätter oft Kristallsand, kleine Kristalle aus Calciumoxalat.

Der obere Teil der Spatha ist dünn, der untere Teil dicker. Hier gibt es ein gut ausgebildetes Aerenchym, das der Kesselwand sogar eine gewisse Festigkeit verleiht. Das Interessanteste an der Spatha ist ihre Epidermis. Sie ist im oberen, freien Teil glatt, allenfalls auf der Innenseite ganz schwach papillös. Stomata sind hier zwar vorhanden, aber selten. Auf der Außenseite finden sich nur 2–8 Stomata pro mm<sup>2</sup>, auf der Innenseite sogar weniger als 1 pro mm<sup>2</sup>. Das ändert sich weiter unten, abrupt und dramatisch beim Übergang in den Kessel. Auf der Außenseite der Kesselwand (Abb. 20) gibt es 50–90 Spaltöffnungen pro mm<sup>2</sup>, auf der Innenseite knapp eine pro mm<sup>2</sup>. Ähnliche Werte ermittelten Bermadinger-Stabentheiner und Stabentheiner (1995).



**Abb. 18:** Junge Beere, Perikarp. Riesiger Kern einer Raphidenzelle mit deutlich erkennbarem Nukleolus. KE; Vergr. 400fach. – **Abb. 19:** Junge Beere, Perikarp. Raphidenidioblast mit riesigem Zellkern in Profilsicht. KE; Vergr. 400fach.

Anstelle der Spaltöffnungen gibt es auf der Innenseite der Kesselwand freie Interzellularlücken zwischen den Epidermiszellen, offene Verbindungen zu den Interzellularen des Aerenchyms, wie Knoll (1923) nachgewiesen hat. Zwischen den in Aufsicht polygonalen Epidermiszellen löst sich dort, wo drei Zellen aneinander stoßen, die Mittellamelle auf und es entstehen dreieckige (Abb. 21) bis rundliche (Abb. 22) Öffnungen, die nicht von der Cuticula überspannt sind.

Im unteren Teil des Kessels ist die Epidermis glatt und die Lücken sind klein; ganz unten fehlen sie ganz. Im oberen Teil – im Halsteil des Kessels unter der Reuse – sind die Epidermiszellen papillös und die Lücken sind größer. Nach Knoll (1923) beträgt die Querschnittsfläche der Lücken, bezogen auf die Flächenansicht der Epidermis, in der Kesselbasis 3%, in der Kesselmitte 5% und oben im Kessel 17%. Die Epidermislücken kommen, anders als Krause und Werthmüller (1991) angeben, nicht im oberen Teil der Spatha vor. Die Papillen im oberen Bereich des Kessels verhindern, dass sich Insekten bei ihren Versuchen, den Kessel zu verlassen, mit Borsten an ihren Beinen und Füßen in den Lücken festhaken. Weiter unten ist das nicht nötig.

Es ist sicher kein Zufall, dass die vielen Spaltöffnungen außen, die Epidermislücken innen und das verbindende Aerenchym zusammen vorkommen. Sie bilden ein perfektes Durchlüftungssystem. Das kann in seiner Durchlässig-

keit durch das Öffnen und Schließen der Stomata kontrolliert werden. Eine weitere Regulation auf der Innenseite des Kessels ist nicht notwendig. Hinzu kommt, dass die Transpirationsrate hier sicher sehr gering ist. Der Kessel ist ja von der Außenluft weitgehend abgeschlossen.

Welche Funktion haben die Epidermislücken? Im klassischen *Lehrbuch der Botanik für Hochschulen*, dem „Strasburger“ steht in der 35. Auflage auf S. 773 (wie in früheren Auflagen): *Die Freisetzung der Duftstoffe wird durch die Wärmeentwicklung im Kolben und durch die Öffnung des Interzellularsystems nach außen („Lückenepidermis“) gefördert.* (Kadereit, 2002). Das ist nicht richtig, zumindest missverständlich ausgedrückt. Eschrich (1995) suchte (infolge dieser Aussage?) die Epidermislücken im Kolben und fand sie – natürlich – da nicht (S. 337). Mit der Freisetzung der Duftstoffe können sie direkt nichts zu tun haben.

Knoll (1923) glaubte, dass das Kohlendioxid, das ja von der Keule bei der intensiven Atmung reichlich produziert wird, in den Kessel absinkt, weil es schwerer als Luft ist, und die Vitalität der dort gefangenen Insekten beeinträchtigt, wenn es nicht über die Epidermislücken und die Spaltöffnungen nach außen abfließen kann. Er nimmt also einen Luftstrom von oben nach unten und von innen nach außen an, zweifelt aber selbst etwas an dieser Idee, weil ihm aufgefallen ist, dass die Lücken, anders als

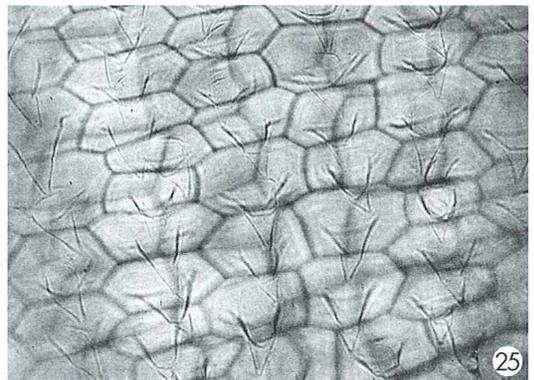
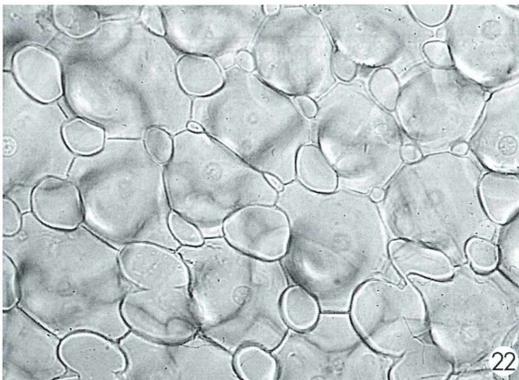
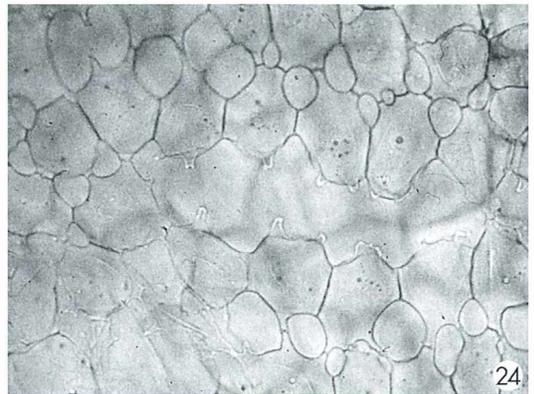
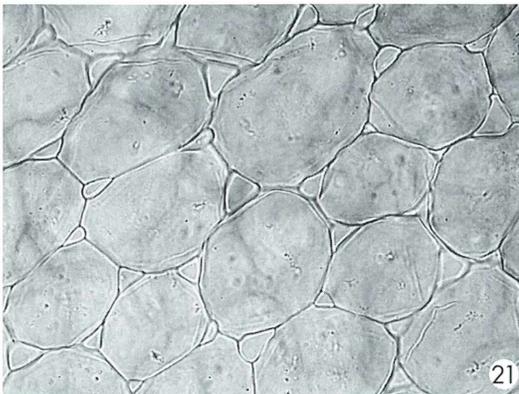
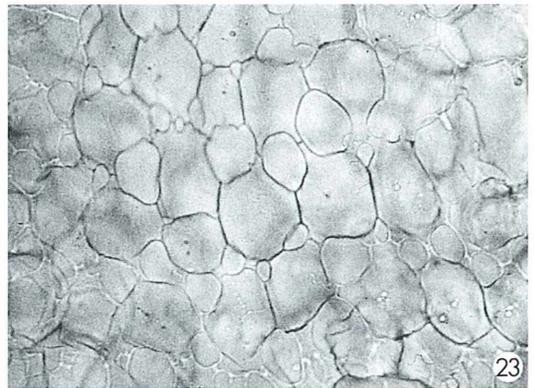
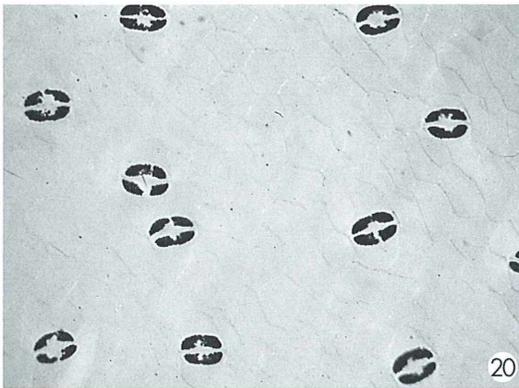


Abb. 20: Spatha kurz nach der Blühphase. Kesselwand außen mit zahlreichen Spaltöffnungen. Lugol; Vergr. 145fach. – Abb. 21: Spatha, Ende der Blühphase. Kesselwand innen/Mitte. Glatte Lückenepidermis. Lugol; Vergr. 375fach. – Abb. 22: Spatha, Blühphase. Kesselwand innen/unten. Epidermiszellen papillös, zwischen ihnen große Lücken. Lugol; Vergr. 375fach. – Abb. 23: *Ceropogia woodii*, offene Blüte. Kesselwand innen/unten. Lückenepidermis. Lugol; Vergr. 350fach. – Abb. 24: *C. woodii*, offene Blüte. Kesselwand innen/unten. Lückenepidermis mit einer großen Aufriszstelle. Lugol; Vergr. 320fach. – Abb. 25: *C. woodii*, offene Blüte. Kesselhals. Epidermiszellen mit nach unten gerichteten Papillen. Lugol; Vergr. 350fach.

zu erwarten wäre, oben im Kessel am größten sind und unten ganz fehlen.

Die Versorgung der gefangenen Insekten – es können sehr viele sein – mit Sauerstoff wird sicher durch das Stomata-Aerenchym-Epidermis-lücken-System verbessert, denn die Lufttemperatur im Kessel wird durch die Erwärmung des Kolbens im Bereich der männlichen Blüten erhöht. Sie wird leichter und steigt nach oben und nicht nach unten. Frischluft von außen strömt durch die Kesselwand nach. Hinzu kommt, dass die Insekten selbst die Temperatur im Kessel erhöhen. Das Belüftungssystem des Kessels wirkt wie ein Kamin. Dieser Kamin und die an der Keule vorbei streichende und da weiter erwärmte aufsteigende Luft helfen sicher außerdem, die Duftstoffe zu verbreiten.

Spatha, Kessel, Gleitfalle, Anlockung durch Duft, starke Atmung durch Verbrauch großer Mengen von Kohlenhydraten: Ein großer Aufwand. Im Sommer sitzen an den Kolben viele Beeren. Das System funktioniert also gut. Es geht aber anscheinend auch ohne diesen Aufwand. Schmucker (1925) gibt an, er habe bei wild wachsenden Aronstab-Pflanzen die Keule aus der Blume im Knospenzustand heraus geschnitten, wodurch der Fruchtsatz nur geringfügig beeinträchtigt wurde. Ebenso wenig wirkte die Entfernung der Spatha. Nur wenn er Spatha und Keule entfernte, war die Beerenmenge um etwa 60% geringer. Könnte es sich hier um Selbstbestäubung handeln? Eigentlich glauben alle Autoren, dass es die bei *Arum* nicht gibt.

### Vergleichbare Fangkessel anderer Pflanzenarten

Wie *Arum maculatum* haben auch andere *Arum*-Arten eine Lückenepidermis im Fangkessel, nicht hingegen die Aracee *Sauromatum guttatum*, die dem Aronstab in blütenbiologischer Hinsicht sonst sehr ähnlich ist. *Sauromatum* hat statt der Lücken auch auf der Innenseite der Kesselwand sehr viele Stomata, also auch ein Kaminsystem.

Eine Lückenepidermis gibt es aber auch bei einer ganz anderen, nicht mit den Aronstabgewächsen verwandten Pflanze, der Leuchterblume *Ceropegia woodii*, eine Asclepiadacee (Linsbauer, 1930). Sie wird als Ampelpflanze oft kultiviert. *Ceropegia woodii* lockt bestäubende Insekten ebenfalls mit Aasduft an und

fängt sie vorübergehend in einer Kesselfalle. Diese wird aber hier, anders als beim Aronstab, von Blütenblättern gebildet.

Der Duft wird von den braun-rot gefärbten Spitzen der fünf Kronblätter emittiert, die vorn miteinander verwachsen sind. An den Flanken bleiben Spalten offen. Die Blüte bekommt so die Form eines Lampions. Die Blütenblätter haben da, wo sie die Kesselwand bilden, und nur da, außen viele Stomata und innen Epidermis-lücken (Abb. 23), die manchmal recht groß sind und nicht nur in den Ecken entstehen, in denen drei Epidermiszellen zusammenstoßen. Manchmal scheint die Epidermis regelrecht aufzureißen (Abb. 24). Die in der Gleitfalle gefangenen Insekten können nicht entweichen, weil im sehr engen Blütenhals eine Zone von Epidermiszellen je eine abwärts gerichtete Papille trägt (Abb. 25). Auf die weiteren blütenbiologischen Besonderheiten von *Asclepiadaceen* kann hier nicht eingegangen werden.

Bei *Ceropegia woodii* könnte das Kaminsystem der Kesselfalle mit der Lückenepidermis primär dazu dienen, die Gefangenen mit Frischluft zu versorgen. Die Verbreitung des Duftes könnte gleichfalls gefördert sein, obwohl nicht bekannt ist, dass sich die Blüte selbst erwärmt. Aber die Insekten im Kessel produzieren ja Wärme.

Die Lückenepidermen in den Fangkesseln von *Arum maculatum* und *Ceropegia woodii* sind schöne Beispiele von Konvergenz. Unabhängig voneinander ist in der Evolution zweimal das Gleiche entstanden.

### Literaturhinweise

- Bermadinger-Stabentheiner, E., Stabentheiner, A.: Dynamics of thermogenesis and structure of epidermal tissues in inflorescences of *Arum maculatum*. *New Phytol.* 131, 41–50 (1995).
- Chen, J., Meeuse, B. J. D.: Purification and partial characterization of two biologically active compounds from the inflorescence of *Sauromatum guttatum* Schott (Araceae). *Plant & Cell Physiol.* 16, 1–11 (1975).
- Diamond, J. M.: Hot sex in voodoo lilies. *Nature* 339, 258–259 (1989).
- Eschrich, W.: Funktionelle Pflanzenanatomie. Springer Verlag, Berlin 1995.
- Haberlandt, G.: Physiologische Pflanzenanatomie. 6. Auflage, Engelmann Verlag, Leipzig 1924.
- Kadereit, J. W.: Spermatophytina, Samenpflanzen. In: Sitte, P., Weiler, E. W., Kadereit, J. W., Bresinsky, A., Körner, C. (Hrsg.): *Lehrbuch der Botanik für Hochschulen*, 35. Auflage, S. 750–884. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2002.

- Knoll, F.: Über die Lückenepidermis der *Arum*-Spatha. Österr. Bot. Zeitschr. 72, 246–254 (1923).
- Knoll, F.: Insekten und Blumen. Experimentelle Arbeiten zur Vertiefung unserer Kenntnisse über die Wechselbeziehungen zwischen Pflanzen und Tieren. IV. *Arum*-Blütenstände und ihre Besucher. Abh. Zool.-Bot. Ges. (Wien) 12, 384–481 (1926).
- Knoll, F.: Die Biologie der Blüte. Springer Verlag, Berlin 1956.
- Krause, D., Werthmüller, K.: Der gefleckte Aronstab. Morphologie, Anatomie und Blühmechanismus von *Arum maculatum*. Mikrokosmos 80, 238–244 (1991).
- Leick, E.: Die Erwärmungstypen der Araceen und ihre blütenbiologische Bedeutung. Ber. Dtsch. Bot. Ges. 33, 518–536 (1915).
- Linsbauer, K.: Die Epidermis. In: Linsbauer, H. (Hrsg.): Handbuch der Pflanzenanatomie, 1. Abt., 2. Teil, Bd. IV, S. 1–284. Bornträger Verlag, Berlin 1930.
- Lüttge, U., Kluge, M., Bauer, G.: Botanik. 2. Auflage, VHC, Weinheim 1994.
- Meeuse, B. J. D.: Thermogenic respiration in Aroids. Annu. Rev. Plant Physiol. 26, 117–126 (1975).
- Raskin, I.: Salicylate, a new plant hormone. Plant Physiol. 99, 799–803 (1992).
- Raskin, I., Turner, I. M., Melander, W. R.: Regulation of heat production in the inflorescences of an *Arum* lily by endogenous salicylic acid. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 86, 2214–2218 (1989).
- Schmucker, T.: Beiträge zur Biologie und Physiologie von *Arum maculatum*. Flora N.F. 18/19, 460–475 (1925).
- Schnepf, E.: Spaltöffnungen, die Ventile der Blätter. Teil 2: Entwicklung, Reaktionen und Alterung. Mikrokosmos 95, 342–350 (2006).
- Schnepf, E., Czygan, F. C.: Feinbau und Carotinoide von Chromoplasten im Spadix-Appendix von *Typhonium* und *Arum*. Z. Pflanzenphysiol. 54, 345–355 (1966).
- Schopfer, P., Brennicke, A.: Pflanzenphysiologie. 6. Auflage, Elsevier Verlag München, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2006.
- Schulte, H.: Die Infloreszenzkolben von *Arum maculatum*. Ein Beitrag zur Histologie. Ber. Dtsch. Bot. Ges. 82, 643–650 (1965).
- Skubatz, H., Nelson, T. A., Dong, A. M., Meeuse, B. J. D., Bendich, A. J.: Infrared thermography of *Arum* lily inflorescences. Planta 182, 432–436 (1990).
- Steiner, M., Löffler, H.: Stickstoffbasen im Eiweißabbau in höheren Pflanzen. II. Histochemische Studien über Verbreitung, Verteilung und Wandel des Ammoniaks und der flüchtigen Amine. Jahrb. wiss. Bot. 71, 463–532 (1929).

Verfasser: Prof. Dr. Eberhard Schnepf, Dürerweg 11, 69168 Wiesloch

## Nachricht

### Meeresbiologische Exkursionen und Tauchkurse auf Elba

Das HYDRA Institut für Meereswissenschaften hat nach einer erfolgreichen Saison nun das Kursprogramm für das nächste Jahr erstellt. Folgende meeresbiologische Kurse/Exkursionen werden angeboten:

- 22.03.–01.04.2007 Marine Lebensräume
- 02.04.–12.04.2007 Allgemeine Meeresbiologie
- 21.07.–31.07.2007 Marine Zoologie
- 31.07.–10.08.2007 Marine Lebensräume
- 11.08.–21.08.2007 Spezialkurs: Fische
- 22.08.–01.09.2007 Allgemeine Meeresbiologie
- 02.09.–12.09.2007 Allgemeine Meeresbiologie
- 13.09.–23.09.2007 Marine Zoologie
- 24.09.–04.10.2007 Marine Lebensräume
- 24.09.–04.10.2007 Methoden der Unterwasserforschung (nur für Taucher)

Der Preis beträgt jeweils 520 €, für die Sommerkurse (Juli, August) 550 €. Bei Teilnahme als Tauchschüler entsteht eine zusätzliche Prüfungsgebühr von 30 €. Zu den Leistungen gehören 10 Übernachtungen in Gruppenappartements, ein achttägiger Biokurs mit acht geführten Biotauchgängen bzw. ein achttägiger Biokurs mit Tauchkurs VDTL/cedip Bronze, jeweils inklusive kompletter Leihausrüstung. Der reine Tauchkurs Bronze (parallel zu den Exkursionsterminen) kostet 450 € bzw. 480 € für die Sommerkurse inklusive Prüfungsgebühr.

Weitere Informationen sind erhältlich bei:

HYDRA Institut für Meereswissenschaften AG,  
Bothmerstr. 21, 80634 München,  
Tel.: 089/13 06 01 31, Fax: 089/89 13 06 01 32,  
E-Mail: [ifm@hydra-institute.com](mailto:ifm@hydra-institute.com),  
Internet: [www.hydra-institute.com](http://www.hydra-institute.com).

# Ein Moos fängt Tiere – Zoophagie bei *Pleurozia purpurea* Teil 2: Untersuchungen in der Natur

Sebastian Hess

Nachdem im ersten Teil dieses Berichtes (Hess, 2007) die Anatomie und Biologie des untersuchten Moooses sowie experimentelle Beweise für die Zoophagie ausführlich dargelegt wurden, folgt nun die detaillierte Beschreibung weiterer Untersuchungen und Beobachtungen bezüglich der Zoophagie in der Natur und möglicher Carnivorie.

**M**it dem Nachweis der Zoophagie bei *Pleurozia purpurea* im Laborversuch taucht zwangsläufig die Frage auf, ob das Lebermoos auch in der Natur Tiere fängt. Das gab den Anlass, im Jahr 2004 nach Schottland zu reisen, um den natürlichen Lebensraum dieses Moooses zu untersuchen. Neben der Art des Biotops und der Begleitflora (in Teil 1 beschrieben), galt die Aufmerksamkeit besonders den Lebewesen, die sich an und in den *Pleurozia*-Pflanzen befinden.

## Erste Zoophagie-Indizien in den Kulturen

Schon während der ersten Zoophagie-Versuche hat sich in den Petrischalenkulturen völlig unerwartet eine reiche Mikrofauna entwickelt, die ebenfalls aus den am *Pleurozia*-Moos mitgebrachten Organismen resultieren muss, da für die Mooskultur Quarzsand Verwendung fand,

der im Trockenschrank sterilisiert wurde; die geschlossenen Petrischalen sollten eine Kontamination von außen verhindern (Abb. 1).

Bei mikroskopischer Betrachtung der Wassersäcke einer *Pleurozia*-Pflanze aus der Kultur findet man eine Vielzahl gefangener Tiere in ihnen vor. Manche Wassersäcke sind regelrecht angefüllt mit Tieren. So befinden sich sehr häufig Fadenwürmer und kleine Flagellaten gefangen in den Wassersäcken. Auch diese Organismen erscheinen wie die Test-Ciliaten im Vorversuch meist vital. Außerdem haben sich Strudelwürmer (Abb. 2) zahlreich in den Kulturen entwickelt. Diese Tiere sitzen am häufigsten in den Fallen fest. Bis zu fünf Tiere waren pro Falle zu zählen.

Inwieweit die Kulturansätze von *Pleurozia* nun mit den Naturverhältnissen zu vergleichen sind, kann man alleine aus diesen Beobachtungen jedoch nicht beurteilen. Die Tierfunde in den Fallen stellen jedoch ein weiteres, durchaus ernst-



**Abb. 1:** Die Petrischalenkultur auf sterilem Quarzsand beinhaltet eine reiche Mikrofauna.

haftes Indiz für die Zoophagie von *Pleurozia purpurea* unter natürlichen Bedingungen dar. Der Beweis dafür kann jedoch nur durch eine direkte Untersuchung am Naturstandort erbracht werden.

### Untersuchung von Naturmaterial

Um dieser Frage nachzugehen, erfolgte besagte Reise nach Schottland. Dort wurden Proben für weitere Untersuchungen genommen. Zur fotografischen Dokumentation des *Pleurozia*-Fundes wurden mit einer Digitalkamera Aufnahmen von Standort, Begleitvegetation und von *P. purpurea* selbst angefertigt. Für die Untersuchungen zur Zoophagie in der Natur wurden einige Proben von *P. purpurea* in sterile Tüten verpackt (Lebendmaterial). Des Weiteren wurden einige Pflanzen vor Ort mit 3,5% Formaldehyd-Lösung fixiert, um möglichst viele Lebewesen an und in den *Pleurozia*-Fallen zu konservieren und somit die naturgetreue Situation für weitere mikroskopische Untersuchungen festzuhalten.

Bei den Pflanzen vom Naturstandort war zunächst auffällig, dass teilweise sehr große Tiere den Wassersäcken zum Opfer gefallen sind. So waren schon durch die Wassersackwände verschiedene Ruderfußkrebse zu erkennen, die hin und wieder in den Fallen zuckten und teilweise schon tot waren (Abb. 3–5). Bei genauerer Bestimmung der Tiere stellte sich heraus, dass es

sich oft um *Bryocamptus minutus* (oder enge Verwandte davon) handelte. Des Weiteren befanden sich in den Fallen nicht selten Fadenwürmer, wie sie auch in Pflanzen aus der Petrischalen-Kultur gefunden wurden (Abb. 6). Teilweise gab es sogar mehrere Nematoden pro Falle.

Die häufigste Beute jedoch scheint ein farbloses Rädertier zu sein, welches sich oft schon bei äußerer Betrachtung der Wassersäcke durch seine kontraktile Kriechbewegungen verrät. Diese Tiere befinden sich in fast jeder Falle und bewegen sich lebhaft an den inneren Wassersackwänden entlang. Bei den Rädertieren scheint es sich um Vertreter der Gattung *Cephalodella* zu handeln. Die Fallen enthalten nicht selten mehrere Tiere und oftmals (besonders ältere Fallen) Detritus sowie Reste zuvor gefangener Tiere (Abb. 7).

Die Anzahl gefangener Tiere hängt sehr stark von der Position der einzelnen Moospflanze ab. Aufrechte Pflanzen, die bei entsprechenden Temperaturen recht trocken werden, enthalten oft keine Tiere, während Pflanzen, die sich in einem feuchten bis nassen Medium befinden (zum Beispiel in nassem Torfmoos), reichlich gefangene Tiere aufweisen.

Die mit Formalin fixierten Pflanzen wurden zunächst von anhaftendem Detritus und Pflanzenteilen befreit und mehrmals gründlich in sauberem Formalin gespült, bis auch die Zwischenräume der Blättchen sauber waren. Danach wurden mit Hilfe des Skalpell alle Oberlappen

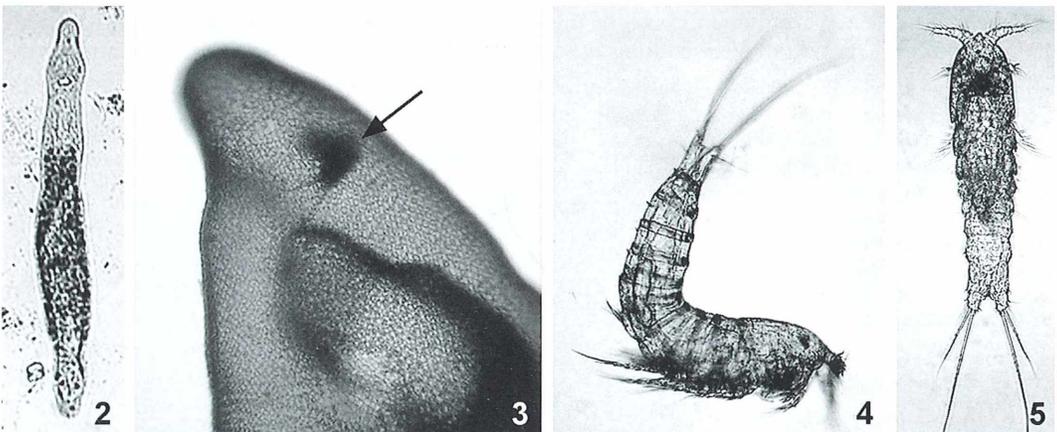
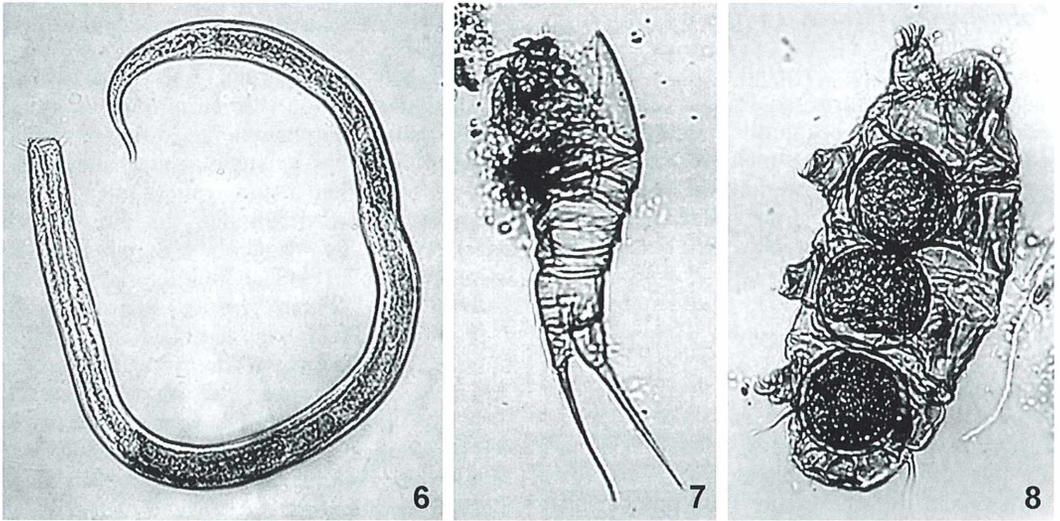


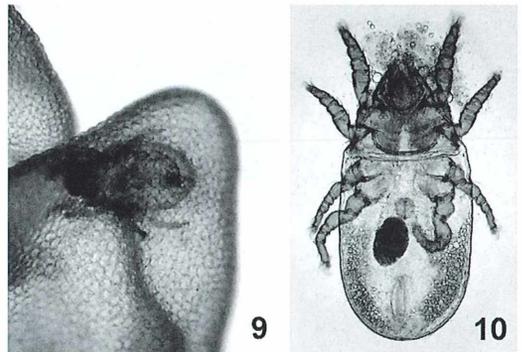
Abb. 2: Strudelwürmer finden sich häufig in der Petrischalenkultur. – Abb. 3: Fundortmaterial: Durch die einzelschichtigen Wassersackwänden erkennbarer Ruderfußkreb (Pfeil). – Abb. 4: Lateralansicht des isolierten Copepoden aus Abbildung 3. – Abb. 5: Isolierter Copepode, dorsal.



**Abb. 6:** Fadenwurm. – **Abb. 7:** In den Fallen des Naturmaterials befinden sich häufig Überreste gefangener Tiere, hier Exoskelett eines Copepoden. – **Abb. 8:** Bärtierchen, häufige Beute in der Natur.

der Oberblätter entfernt, sodass die Wassersäcke (Unterlappen) frei lagen. Durch Entlangfahren der Skalpellklinge über den Zentralstängel an der Basis der Wassersäcke wurden dieselben abgetrennt. Die gefangenen Tiere wurden aus den Wassersäcken präpariert, bestimmt und fotografisch dokumentiert.

Auch bei den fixierten Pflanzen fanden sich Ruderfußkrebse und Fadenwürmer in den Fallen. Mit Abstand die häufigste Beute war erstaunlicherweise jedoch eine Bärtierchenart (Abb. 8), ein Tier, welches zuvor noch nicht in *Pleurozia*-Fallen gefunden wurde. Weiterhin waren sogar Spinnentiere in den Fallen zu finden. Es handelte sich dabei um Milben, die mit Abstand die größten Opfer darstellen (Abb. 9 und 10). Teilweise waren sie so groß, dass sie den gesamten oberen Innenraum des Wassersackes ausfüllten und es ein Rätsel war, wie die Tiere in die engen Wassersäcke gekommen waren. Diese sind nämlich völlig unbeschädigt geblieben. Von Rädertieren und Ciliaten fehlte hingegen jede Spur. Diese Tiere haben sich möglicherweise durch die Fixierung mit Formalin bis zur Unkenntlichkeit verändert. Ein Kontrollversuch mit dem Ciliaten *Blepharisma americanum* und einigen Rädertieren zeigte, dass Ciliaten kurze Zeit nach Formalinzugabe an Plasmaausstülpungen zu Grunde gehen und nach einiger Zeit vollends lysieren, während



**Abb. 9 und 10:** Milben. Ein im Wassersack befindliches Tier (Abb. 9) wurde herauspräpariert (Abb. 10).

die Rädertiere sich zu einem undefinierbaren Klümpchen kontrahieren.

Die Untersuchungsergebnisse bestätigen, dass *P. purpurea* auch in der Natur Tiere fängt, und sie geben Aufschluss über das Spektrum der gefangenen Tiere. Erstaunlich ist, dass *P. purpurea* in der Natur entgegen der Vermutung, dass die Wassersäcke besonders für Protozoen eine Falle darstellen, häufig mehrzellige Tiere fängt. Die Ähnlichkeit des Artenspektrums in Petrischalenkultur und Natur spricht für die Indizien aus der Petrischalen-Fauna.

## Carnivorie bei *Pleurozia purpurea*?

Eine weitere Frage ist der Nutzen der Zoophagie für *Pleurozia purpurea*. Im Laufe der Evolution setzen sich ja bekanntlich jene Merkmale durch, die einem oder mehreren Lebewesen einen Vorteil zur Selbsterhaltung beziehungsweise zur Arterhaltung verschaffen. So ist offensichtlich, dass so komplexe Wassersäcke mit einer Fallenstruktur wie bei *Pleurozia* sich nicht zufällig entwickelt beziehungsweise durchgesetzt haben. Da die Wassersäcke den Fallen mancher carnivorer Pflanzen sehr ähnlich sind, liegt es nahe, die Carnivorie auch bei *P. purpurea* zu vermuten. Um diese Frage bei *P. purpurea* zu klären, muss man die Pflanze auf die typischen Merkmale der Carnivorie (siehe Teil 1 dieses Berichtes) hin untersuchen. So ist es sinnvoll, zunächst die schon erwähnte Anlockwirkung auf Mikroorganismen zu untersuchen, da die Anlockung zu den Merkmalen der Carnivorie zählt.

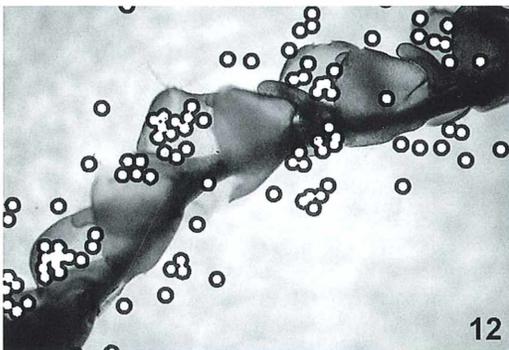
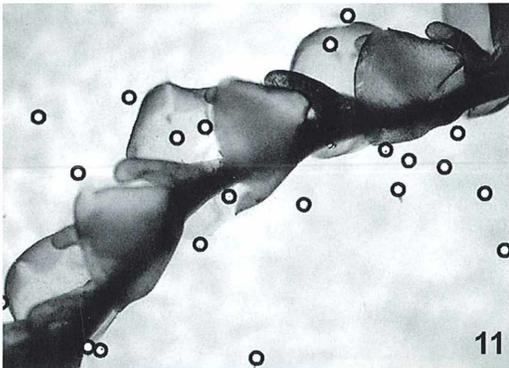


Abb. 11 und 12: Versuch zur Anlockung: Ciliaten (durch Kreise markiert) sammeln sich nach kurzer Zeit an der Moospflanze an. – Abb. 11: Versuchsbeginn. – Abb. 12: Nach 30 min.

## Anlockung

Um die bei dem Zoophagie-Test beobachtete Anlockwirkung von *Pleurozia purpurea* auf *Blepharisma americanum* zu dokumentieren, wurde ein solcher Versuchsansatz in verschiedenen Zeitabständen fotografiert und die einzelnen Zellen auf den Bildern graphisch durch Markierungen hervorgehoben. Bereits nach 30 Minuten hat sich ein Großteil der in der Kultur befindlichen Ciliaten an den Blättchen von *P. purpurea* angesammelt (Abb. 11 und 12).

Durch Versuchsansätze, die von Licht abgeschirmt wurden, konnte eine negative Photokinese als Ursache der Zellansammlung ausgeschlossen werden. Im späteren Vergleich stellte sich heraus, dass die Anlockwirkung unabhängig vom Lichteinfluss ist. Mit der gleichen Anordnung hat man ebenso die positive Aerotaxis ausgeschlossen, da die Sauerstoffproduktion von Seiten der Pflanzen nur unter Belichtung möglich ist. Zudem wäre eine solche Reaktion für *B. americanum* höchst untypisch. Vermutlich liegt also im beobachteten Falle eine positive Chemotaxis vor, die durch die Kontamination der *Pleurozia*-Pflanzen mit anderen Organismen und toter organischer Materie nur bedingt untersucht werden kann.

## Eventuelle *Pleurozia*-*Sphagnum*-Konkurrenz

Ob auch in der Natur eine Anlockung stattfindet, kann man ohne weiteres nicht erschließen, da sich alle Beobachtungen zur Anlockwirkung ausschließlich auf Laborexperimente mit dem Ciliaten *B. americanum* beziehen. Durch die Untersuchungen und Befunde des Schottland-Materials wird allerdings klar, dass eine eventuelle Anlockung in der Natur auch ganz andere Tiere mit einschließen kann. Wie in Teil 1 erwähnt, lebt *P. purpurea* in der Natur eng mit dem Torfmoos *Sphagnum* zusammen, so dass die *Pleurozia*-Pflanzen häufig regelrecht in die *Sphagnum*-Polster eingebettet sind. Sollte eine effektive Anlockung der Beutetiere in der Natur stattfinden, müsste die Anlockwirkung von *Pleurozia* die des Torfmooses übersteigen. Es wäre eine Konkurrenz gegeben. Der Grund dieser stärkeren Anlockwirkung wäre dabei völlig unerheblich. Präferenztests haben bisher noch keine zuverlässigen Ergebnisse liefern können.

## Verdauung und Nährstoffresorption

Ein weiterer typischer Hinweis auf Carnivorie ist die Sekretion von Verdauungsenzymen zur Zersetzung der gefangenen Tiere. Bei *P. purpurea* ist ein Nachweis solcher Enzyme in derart kleinen Dimensionen nur in einem gut ausgerüsteten Labor realisierbar. Dieses steht allerdings zurzeit nicht zur Verfügung.

Die Beobachtungen lebender Tiere in den Wassersäcken zeigen zudem, dass diese Organismen völlig unbeschadet über längere Zeit in den Fallen leben und teils sogar ganz ungestörtes Verhalten zeigen. In Gegenwart von Zersetzungsenzymen, die der Verdauung von tierischem Material dienen, würden die Tiere sicher Schaden nehmen und schließlich daran zu Grunde gehen. Außerdem ist der Nutzen von Verdauungsenzymen bei *Pleurozia* in Frage zu stellen, da die Beutetiere in den Fallen festsitzen, auf Dauer zu Grunde gehen und von Mikroorganismen zersetzt werden könnten (Bakterien sind als Zersetzer in den Schlauchfallen von *Sarracenia purpurea* nachgewiesen). Da Moose die lebensnotwendigen Nährsalze über die gesamte Oberfläche einschließlich der Blättchen aufnehmen, finden wir bei *Pleurozia purpurea* kein spezielles Resorptionsgewebe. Eine Nährstoffaufnahme wäre die unmittelbare Konsequenz einer Mineralisierung der Beutetiere durch Destruenten wie Bakterien.

## Fazit

Im Ganzen ist anzunehmen, dass manche der häufigen Carnivorie-Merkmale sicher nicht bei *Pleurozia* nachzuweisen sind, sodass Carnivorie bei Bryophyten vielleicht anders definiert werden müsste. Es ist vorstellbar, dass Moose denselben Nutzen wie carnivore Kormophyten aus dem Fang von Tieren ziehen, sie jedoch wegen ihrer einfacheren Organisation auch nur die grundlegenden Merkmale der Carnivorie aufweisen. Zudem lässt sich nicht ausschließen, dass es sich wie bei den Präcarnivoren um komplexere Zusammenhänge (beispielsweise Symbiosen mit Bakterien) handelt, da *Pleurozia* die eingefangenen Organismen nicht unmittelbar zu töten scheint. Dennoch stellt der Tierfang dieses im Extremstandort Moor beheimateten Lebermooses eine Analogie zu den höheren carnivoren Pflanzen im gleichen Habitat dar.

## Danksagung

Zunächst möchte ich Prof. Dr. Jan-Peter Frahm vom Nees Institut für Biodiversität der Pflanzen der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn für das Bereitstellen des ersten *Pleurozia*-Materials, die Informationsbeschaffung und die zahlreichen Hilfestellungen danken. Prof. Dr. Norbert Wilbert danke ich für das Bereitstellen der Ciliaten-Kulturen und für Tipps zu deren Kultur. Meinen Lehrern Frau Gude (Biologie) und Herr Wissemann (Chemie) sei für die Unterstützung mit Geräten, Chemikalien und Ratschlägen gedankt. Ein ganz besonderer Dank kommt meinem Freund Karsten Günther zu, der sich einerseits als Pflanzensammler konkreten Fragestellungen zugewandt hat, andererseits mich mit ermutigenden Worten motiviert und unterstützt hat, wenn Probleme auftauchten. Klaus Heuser und Martin Schmalenbach der Biologie-Abteilung des Aggerverbands möchte ich für diverse Mikrofotos und das Problem lösende Interesse an der Thematik danken. Für die freundliche Informationsbereitstellung und die In-Vitro-Versuche mit *Pleurozia* möchte ich Prof. Hans Becker und Klaus Gladel der Universität des Saarlandes danken. Jonathan Sleath, Gordon Rothero und Mark Pool von der British Bryological Society und Richard Weyl danke ich für sämtliche Informationen über das *Pleurozia*-Vorkommen in Schottland. Zuletzt habe ich auch meinen Eltern für Unterstützung und Ermöglichung meiner forschenden Tätigkeiten zu danken.

## Bildnachweis

Alle Fotografien (Abb. 8 ausgenommen) wurden vom Autor mit der Digitalkamera Casio QV-3500 EX in Kombination mit Stereo-Lupe oder Mikroskop angefertigt. Abbildung 8 wurde in der Biologie-Abteilung des Aggerverbands, Gummersbach, an einem inversen Mikroskop erstellt.

## Literaturhinweis

Hess, S.: Ein Moos fängt Tiere – Zoophagie bei *Pleurozia purpurea*. 1. Teil: Anatomie und Biologie des Lebermooses. Mikrokosmos 96, 35–42 (2007).

# Nachricht

## Drittes Treffen des Mikroskopie-Forums in Darmstadt

Nachdem es beim letzten Treffen auf Grund des jahreszeitlich frühen Termins relativ kalt (und feucht) war, wurde dieses Jahr für das Treffen ein späterer Zeitpunkt gewählt. Die höheren Temperaturen zeigten, dass die Entscheidung richtig war. Es zahlte sich aus, denn der botanische Garten von Darmstadt stand in voller Blüte, und die Planktonfänge bei den Exkursionen waren wesentlich ergiebiger. Vorab traf sich wie jedes Jahr das Organisationsteam bereits einen Tag früher, um das bevorstehende Treffen nochmals durchzusprechen und die umfassenden Gerätschaften aufzubauen.

Das eigentliche Treffen begann am Freitagnachmittag. Erstmals hielt Dekan Prof. Dr. Gerhard Thiel von der autonomen Technischen Universität Darmstadt die Begrüßungsrede. In seiner Ansprache unterstrich Professor Thiel unter anderem, dass diese Treffen der Mikroskopiker nicht nur jederzeit in den Räumen der Universität willkommen seien, sondern sich die Universität auch eine Zusammenarbeit mit den Teilnehmern wünsche. Denn die Universität fände durch das breit angelegte Fachwissen der Teilnehmer eine willkommene Unterstützung. Diese aufmunternden Worte fanden eine breite Zustimmung bei den 30 Zuhörern.

Nach den Begrüßungsworten wurde als Schwerpunkt für den Freitagnachmittag die Pflanzenanatomie gesetzt. Dr. D. Kramer führte die Zuhörer in den Aufbau von Pflanzenstängeln ein. Anschließend wurde geschnitten, gefärbt und die Ergebnisse zu Dauerpräparaten verarbeitet. Die Teilnehmer zeigten sich beeindruckt, wie schnell man mit der richtigen Vorgehensweise vom Frischmaterial zum eingebetteten Präparat kam. Neben den Pflanzenschnitten wurden Proben aus dem Botanischen Garten untersucht. Die optische Ausstattung war sehr gut. Neben den Axiostars (ausgestattet mit Hellfeld, Dunkelfeld und Phasenkontrast) und Stemis 2000 standen noch ein Axioskop mit G5 sowie ein Orthoplan mit angeschlossener Motic-Cam (Live-Übertragung auf einen Beamer) zur Dokumentation zur Verfügung.

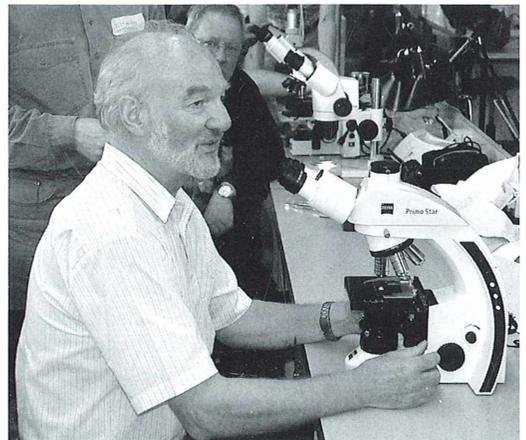
Am späten Nachmittag stellte die Firma Zeiss ihr neuestes Mikroskop vor (Abb. 1). Der PrimoStar gehört zu einer neuen Generation von Ausbildungsmikroskopen von Carl Zeiss und soll eine hohe Leistung bei einem günstigen Preis bieten. Die Teilnehmer des Treffens hatten nun das ganze Wochenende die Möglichkeit, das Mikroskop auf „Herz und Nieren“ zu prüfen. Dies wurde auch ausgiebig genutzt, und so konnte man sich unabhängig seine Meinung über das neue Produkt bilden.

Inzwischen ist es schon zur Tradition geworden, dass am ersten Tag der Botanischen Garten von Darm-

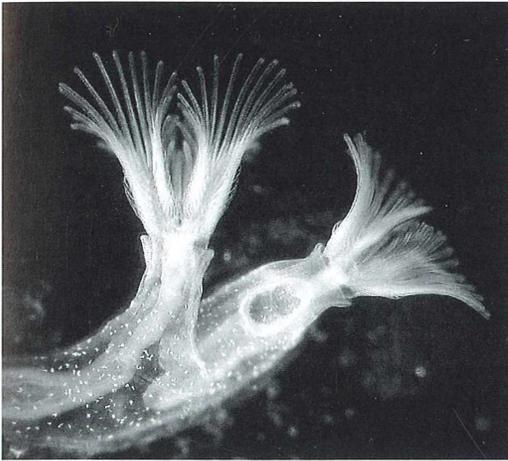
stadt besucht wird. Wie immer, gab es viel zu sehen und zu bestaunen. Unter anderem konnten sich Teilnehmer des ersten Treffens (2004) über die Entwicklung des Projektes Sanddüne informieren. Hier haben sich bereits einige Arten angesiedelt, welche auf der Roten Liste stehen. Im Garten an sich standen viele Raritäten in voller Blüte. Leider richtete die am darauf folgenden Tag durchziehende Kaltfront erhebliche Schäden an.

Abschließen hielt am Freitagabend Dr. Kramer einen Vortrag über die Grundlagen, Entwicklung und Möglichkeiten der Elektronenmikroskopie. Eindrucksvoll erläuterte er den geschichtlichen Verlauf, die physikalischen Grundlagen und den heutigen Stand der Entwicklung. Dieser Vortrag fand im Seminarraum des Hotels Gebrüder Grimm statt, wo sich die Teilnehmer auch dieses Jahr wieder einquartiert hatten.

Am Samstagvormittag übernahm Siegmund Dehmer die Führung und zeigte der Gruppe das Gebiet um den Ludwigsteich, welches am Naturschutzgebiet „Kleiner und großer Bruch“ angrenzt. Während der Wanderung bot sich auf einer versteckten Waldlichtung mit drei kleinen Teichen die Möglichkeit zur Probennahme. Zur Mittagszeit wurde in der Fischerhütte zum gemütlichen Essen eingekehrt. Helmut Ullrich zeigte am Nachmittag die Herstellung von Diatomeen-Streupräparaten. In einem separaten Raum führte er die einzelnen Schritte von der Anreicherung und Aufbereitung von Diatomeen-Proben bis hin zum fertigen Dauerpräparat vor. Das hoch



**Abb. 1: Dr. Kramer beim Testen des PrimoStars (Fotos: Gerald Helbig, Prien).**



**Abb. 2: Moostierchen *Plumatella repens***

interessierte Publikum zeigte sich begeistert. Auf Grund der begrenzten Arbeitsplätze im Chemiesaal konnte leider nur eine limitierte Teilnehmerzahl an diesem professionellen Workshop mitarbeiten. So wurde von vielen Seiten der Wunsch geäußert, dass dieser Workshop beim nächsten Treffen wiederholt und weitergeführt werden sollte.

Wer nicht an dem Diatomeen-Workshop teilnehmen konnte, untersuchte die reichhaltigen Proben vom Vormittag. Die von Siegmund Dehmer gezeigten Teiche erwiesen sich als wahre Fundgrube: Herzflagellaten, Dinoflagellaten, Glockentierchen, Moostierchen (Abb. 2) und vieles mehr. Auch standen die Schnittpräparate vom Freitag zur Verfügung und Helmut Ullrich hatte noch eine frische Probe Nordseeschlick mitgebracht. Als Höhepunkt präsentierte Ralf Nötzel eines seiner perfekt gelegten Kreispräparate mit circa 50 Diatomeen. Wie jedes Jahr lag auch diesmal der eigentliche Schwerpunkt des Treffens beim gegenseitigen Kennenlernen und Fachsimpeln. Da viele Teilnehmer bereits das dritte Mal angereist wa-

ren, fanden sehr schnell intensive Fachgespräche statt. Und auch dieses Jahr wieder verzauberte Thomas Schäfer den Samstagabend mit seinen Zauberkünsten.

Eine sehr interessante geologische Wanderung auf den Hubberg bei Weinheim wurde am Sonntag unternommen. Ludwig Meitzler führte die Wanderung und erklärte die Gesteinsaufschlüsse am Wegesrand. Beispielsweise handelte es sich hierbei um Brandungsgeröll und schwach verfestigter Sandstein von damaligen Dünen: Hinterlassenschaften der Gezeitenzone der Brandungsküste eines warmen Flachmeeres aus dem Oligozän (vor ca. 40 Mio. Jahren). Der Weg führte des Weiteren zu schönen Aussichtspunkten über den Odenwald und in den Rheingraben. Abschließend kehrte die Gruppe in einer gemütlichen Gaststätte in Weinheim ein, wo sonniges Wetter zum Sitzen im Garten einlud.

Nach dem dritten Treffen lohnt es sich, ein wenig zu bilanzieren und sich zu fragen, was beibehaltenswert ist und was eventuell verändert werden sollte. Diese Frage haben die Organisatoren allen Anwesenden gestellt und auch eine Reihe Antworten erhalten, welche in die Überlegungen einfließen werden. Ein herzliches Dankeschön an alle, die dieses Treffen ermöglicht und gestaltet haben. Auch ein Danke an die TU Darmstadt, deren Räumlichkeiten und Gerätschaften wir wieder benutzen durften. Selbstverständlich wird es auch 2007 ein Treffen in Darmstadt geben. Spontan haben sich bereits einige Teilnehmer zu Vorträgen für das Treffen 2007 angeboten. Es verspricht wieder ein interessantes und breit gefächertes Treffen zu werden. Der Termin hierfür wurde auf den 15.06 bis 17.06.2007 festgelegt.

Die Internetseite unseres Mikroskopie-Forums im Internet lautet: [www.mikroskopie-forum.de](http://www.mikroskopie-forum.de).

Weitere Informationen sind zu erhalten bei:  
Gerald Helbig, Jensenstraße 12, 83209 Prien;  
E-Mail: [info@lebendkulturen.de](mailto:info@lebendkulturen.de)

Gerald Helbig, Prien

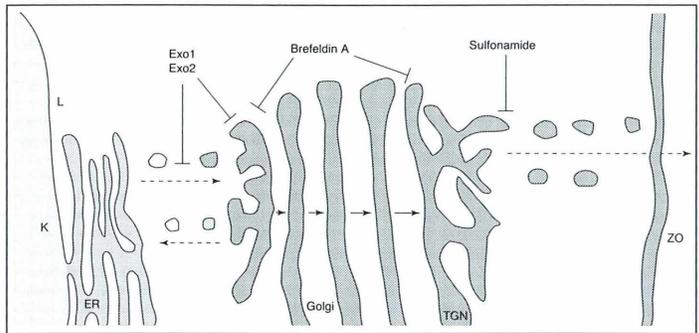
## Kurze Mitteilung

### Chemische Skalpelle

Skalpelle sind Instrumente des Chirurgen. Diese Messer mit feststehender, rasiermesser-scharfer Klinge gestatten es, mit geschickter Hand feine Schnitte anzubringen und so Teile voneinander zu trennen. Die komplexen zellulären Prozesse erfordern auch Methoden, mit

denen es möglich ist, die Teilprozesse an den mikroskopischen und submikroskopischen Strukturen zu trennen und zu untersuchen. Das Messer war in der Frühzeit der Mikroskopie ein unentbehrliches Hilfsmittel: Viele Erkenntnisse der Zellkunde wären nicht möglich gewe-

**Abb. 1:** Ein Beispiel für die Anwendung chemischer Skalpelle, um zelluläre Prozesse gerichtet zu unterbrechen: Kleine Moleküle wirken auf den Sekretionsprozess der Golgi-Vesikel. Das Endoplasmatische Retikulum (ER) entsteht aus der Kern (K)-Membran, links; Leptomycin B (L) blockiert den nuklearen Membran-Export durch Hemmung des Kern-Export-Rezeptors; Exo 1 und Exo 2 blockieren den Austritt der Proteine aus dem ER und verursachen damit eine Störung des Golgi-Apparates; Exo 1 blockiert den Transport aus dem ER in den Golgi-Apparat und induziert eine Umverteilung des Inhaltes des Golgi-Apparates zurück in das ER, stört aber nicht die rasche Freisetzung der Trans-Golgi-Netzwerk (TGN) assoziierten Mantel-Proteine; Exo 2 blockiert den Transfer vom ER zu Golgi, jedoch ohne das TGN zu zerstören; Brefeldin A verursacht den Kollaps des Golgi-Apparates in das ER durch Stabilisierung der GTPase-Arf1 in eine inaktive, GDP-gebundene Form. Die Sulfonamid enthaltenden Moleküle unterbrechen den Transport der Proteine aus dem Golgi-Apparat zur Zelloberfläche (ZO), ohne aber die vorausgehenden Transport-Schritte zu beeinflussen (aus Hathaway und King, 2005).



sen ohne die Dünnschnitte, welche im durchfallenden Licht des Mikroskopes ihre Details erkennen lassen. Die Fortschritte der Zellbiologie haben zur Einführung von chemischen Messern (Skalpellen) geführt, die es ermöglichen, Einblicke in die Feinstrukturen der Zellen und ihre Funktionen zu erhalten. Dazu werden niedermolekulare Verbindungen benutzt, welche in Teilprozesse der lebenden Zelle eingreifen, sodass es zu Veränderungen (Unterbrechungen, Anhäufungen) kommt, aus denen man Rückschlüsse auf das Geschehen in der Zelle ziehen kann. So gibt es heute schon eine ganze Vielfalt von Chemikalien, die es gestatten, das Zytoskelett, den Eiweißtransport und die Sekretion, aber auch die Wanderung der Zellorganelle spezifisch zu zerschneiden, beziehungsweise zu unterbrechen. Als Beispiel sei der sekretorische Ablauf des Proteintransportes von der Membran des Zellkerns bis an die Zelloberfläche genannt (Abb. 1). Hier sind es vor allem fünf verschiedene kleinmolekulare Verbindungen, die auf spezifische Weise in den Transportmechanismus eingreifen: Das Fungizid Leptomycin B, das auch antivirale Eigenschaften hat, hemmt den nuklearen Transport in das Endoplasmatische Retikulum (ER). Der Übergang von Proteinen aus den ER in den Golgi-Apparat wird durch die kleinen Moleküle Exo 1 und Exo 2 blockiert. Brefeldin A blockiert den Protein-

transport im Golgi-Feld. Und schließlich unterbrechen die Sulfonamide enthaltenden Moleküle den Transport aus dem Golgi-Apparat an die Zelloberfläche, ohne jedoch die vorausgehenden Transportschritte zu beeinflussen; sie erhöhen den endosomalen und lysosomalen pH-Wert, führen zur Herunterregulierung der Zelloberflächenrezeptoren, behindern das Recycling der Transferrinrezeptoren an der Plasmamembran und hemmen direkt die ATP-Hydrolyse.

Von den mehr als 4.800 untersuchten Chemikalien erwiesen sich 14 Verbindungen als spezifische Hemmstoffe (Sortine), die es gestatten – oft reversibel – einzelne Teilschritte des zellulären Metabolismus zu unterbrechen, diese also gleichsam mit dem chemischen Skalpell zu trennen.

#### Literaturhinweis

Hathaway, N. A., King, R. W.: Dissecting cell biology with chemical scalpels. *Current Opinion in Cell Biology* 17, 12–19 (2005).

# Ein besonderer Winteraspekt: Ruderfußkrebse (Copepoden) als Laubbewohner in bodenfeuchten Niederungswäldern

Gunnar Gad

Bodenorganismen sind für die Böden, die sie bewohnen, von fundamentaler Bedeutung. Innerhalb der Zersetzergemeinschaft ist die Bodenmesofauna eine wichtige Komponente, zu der Vertreter vieler wirbelloser Tiergruppen gehören. Während der Vegetationsperiode leben in der Laubstreu von Wäldern Springschwänze, Ringelwürmer, Fadenwürmer, Asseln, Hundertfüßer und Milben, um einige der dominierenden Tiergruppen zu nennen. Sie bilden sozusagen den Sommeraspekt der Zersetzergemeinschaft. Kaum bekannt ist, dass während des Rests des Jahres eine andere Lebensgemeinschaft in der Laubstreu aktiv wird und den Winteraspekt bildet. Besonders in bodenfeuchten Niederungswäldern sind in der nassen Falllaubabschicht zu dieser Jahreszeit nicht selten Ruderfußkrebse (Copepoda, Harpacticoida) die mit Abstand vorherrschende Tiergruppe. Ruderfußkrebse sind nach den Insekten eine der erfolgreichsten Gruppen der Arthropoden. Sie haben sich wie kaum eine andere Krebsgruppe in einem Maximum an Lebensräumen etabliert.

**R**uderfußkrebse oder Copepoden sind gemessen an ihrer Vielfalt an Lebensformen und der Zahl der derzeit bekannten 12.500 Arten die erfolgreichste Teilgruppe der Krebse (Schminke, 1996, 2006). Diese Artenzahl ist vermutlich aber erst ein Siebtel aller tatsächlich existierenden Arten, da schwer zugängliche Lebensräume wie etwa die Tiefsee erst am Anfang der systematischen Erfassung ihres Arteninventars stehen (Bethge, 2006). Copepoden finden sich nicht nur im Plankton und in den Böden der Ozeane, obwohl dort zweifelsohne die meisten von ihnen vorkommen. Sie sind überall anzutreffen, wo sich auch nur ein bisschen Wasser befindet. *Phyllognathopus viguieri* ist eine Art, in deren Anpassungsfähigkeit sich stellvertretend der Erfolg der Copepoden widerspiegelt. *P. viguieri* ist klein, selten mehr als einen halben Millimeter lang und theoretisch in der Lage jeden aquatisch-limnischen Lebensraum zu besiedeln. Man findet sie in kleinen und kleinsten Wasseransammlungen wie Pfützen, Dachrinnen oder Phytotelmen (Blattachselwasser oder Wasseransammlungen in anderen Pflanzenteilen) ebenso wie in Zisternen, Brunnen, Höhlen, im Grundwasser, in Flussbetten oder wassertechnischen Einrichtungen wie Langsandsfiltern. Prinzipiell genügt *P. viguieri* ein dünner Wasserfilm, so dass diese Art

auch in nassen Moosen, der Laubstreu von Wäldern, ja sogar in Komposthaufen vorkommt (Janetzky et al., 1996; Schminke, 2006).

## Der evolutionäre Erfolg der Copepoden

Was bedeutet es, wenn eine Tiergruppe als außerordentlich erfolgreich bezeichnet wird? Wann ist das der Fall und wie lässt sich Erfolg überhaupt messen? Gibt es Kriterien dafür? Copepoden werden mitunter als Insekten der Meere bezeichnet, womit angedeutet wird, dass sie im Meer so erfolgreich sind wie Insekten an Land. Ein Vergleich von Copepoden mit Insekten, wie Schminke (im Druck) ihn durchgeführt hat, hilft vielleicht herauszufinden, was erfolgreiche Tiergruppen auszeichnet. Als Indizien für absoluten Erfolg von Tiergruppen, wie er bei Insekten zweifelsohne zu verzeichnen ist, können gelten:

- Ein hohes phylogenetisches Alter, das eine ununterbrochene Existenz durch lange geologische Zeiträume einschließt.
- Dominanz als Ausdruck oder Schlüsselstellung im Gefüge von Ökosystemen. Diese dokumentiert sich in hoher Individuendichte beziehungsweise Biomasse und lässt sich an dem Einfluss ablesen, der auf koexistierende Organismen ausgeübt wird.

- Eine weite geographische Verbreitung, die eine Präsenz in fast allen Lebensräumen einschließt.
- Ein hoher Grad adaptiver Radiation, der sich in der Besetzung fast aller möglichen ökologischen Nischen niederschlägt.

Egal welches dieser Kriterien herangezogen wird, die Insekten sind die Champions unter den Arthropoden (Gliederfüßer); sie warten in jeder dieser Disziplinen mit Rekorden auf. Dennoch können Copepoden durchaus mithalten, wenn in Kategorien wie Vielfalt der Lebensformen, Bandbreite der besiedelten Lebensräume oder Individuendichte gemessen wird. Copepoden scheinen schon seit dem Kambrium (vor 510 Millionen Jahren) zu existieren und sind seitdem aus den marinen Ökosystemen nicht mehr wegzudenken. Insekten haben sich demgegenüber erst im Devon vor rund 400 Millionen Jahren entwickelt (Grimaldi und Engel, 2005) und mit der Besiedlung des konkurrenzfreien Festlandes eine einmalige Chance genutzt, die sich in einer ungeheuren Radiation an Lebensformen und Arten ausdrückt. Copepoden sind dagegen in aquatischen Lebensräumen allgegenwärtig und haben dort ebenfalls für jede erdenkliche ökologische Nische eine Lebensform oder Lebensweise entwickelt.

Zur Ermittlung der Individuenzahl und der damit einhergehenden ökologischen Bedeutung seien folgende Überlegungen angestellt (Schminke, **im Druck**): Angenommen, jeder Liter Meerwasser enthält nur einen Copepoden, was eine recht geringe Schätzung darstellt, dann befinden sich im Plankton der Ozeane  $13 \times 10^{19}$  Copepoden. Das sind, so weit man weiß, drei Größenordnungen mehr, als es Insekten an Land gibt. Die Individuendichte benthischer (Boden bewohnender) Copepoden in den oberen Zentimetern der Ozeanböden ist in Bezug auf die Fläche sicher deutlich höher anzusetzen. Dazu kommen noch die kommensalischen und parasitischen Copepoden, die auf oder in anderen Tieren leben. Dies verdreifacht die Anzahl der Individuen auf  $39 \times 10^{19}$ . Die Biomasse eines planktischen Copepoden beträgt durchschnittlich 0,036 mg, die benthischen Copepoden sind generell etwas kleiner, so dass sich ihre Biomasse auf etwa 0,020 mg belaufen dürfte. All dies zusammengekommen dürfte die gesamte Biomasse aller Copepoden in den Ozeanen, die immerhin zwei Drittel der Erdoberfläche bedecken, um die  $73 \times 10^{19}$  Tonnen (!) betragen. Im Gegensatz dazu käme der

bekannte Krill nur auf  $4 \times 10^5$  Tonnen (Gleich et al., 2000).

Planktische Copepoden sind *die* Primärkonsumenten, die sich von einzelligen Algen in der oberen Schicht der Wassersäule ernähren. Diese einzelligen Algen sind die wichtigsten Primärproduzenten in den Ozeanen, da sie den größten Teil der Biomasse produzieren. Copepoden haben deswegen zweifelsohne eine wichtige Schlüsselstellung in den Nahrungsnetzen inne und sind als Beute erster Ordnung Nahrungsgrundlage für eine Vielzahl von Konsumenten höherer Ordnungen. Auch die übrigen Copepoden spielen als Parasiten oder wühlende Partikelfresser in den Böden der Ozeane eine wichtige, kaum geklärte Rolle. Ihr Einflussvermögen, Individuenzahl, Biomasse und Schlüsselstellung in den Nahrungsbeziehungen auf die Ökosysteme der Ozeane ist unbestritten und nur vergleichbar mit dem der Insekten auf die Ökosysteme an Land.

Neben dem absoluten Erfolg von Tiergruppen gibt es noch den relativen Erfolg. Gradmesser für relativen Erfolg sind nach Schminke (**im Druck**) Charakteristika im Körperbau und in der Lebensweise, die eine Tiergruppe relativ zu anderen begünstigen. Im Falle der Insekten sind dies geringe Körpergröße, Metamorphose, physiologische Anpassungsfähigkeit, Flugfähigkeit, fein abgestimmtes Paarungsverhalten und ein breites Spektrum an Ernährungsweisen. Setzt man die Fähigkeit, im Wasser energiesparend zu schwimmen und zu schweben, der Fähigkeit gleich, in der Luft zu fliegen, so sind Copepoden auch gemessen am relativen Erfolg den Insekten durchaus ebenbürtig. Auch sie sind klein und damit prädestiniert, Lückensysteme in einer vielfältig strukturierten Umwelt zu besiedeln. Sie verfügen ebenfalls über eine kurze Generationsdauer, sie haben eine Larvenphase (Nauplien) und eine Jugendphase (Copepodide), die sich durch Bau und Lebensweise fundamental unterscheiden und durch eine Metamorphose voneinander getrennt sind. Etliche Arten sind sogar in der Lage, Dauerstadien auszubilden und so ungünstige Umweltbedingungen zu überdauern.

Bei den Copepoden bilden Mandibeln, erste und zweite Maxillen sowie die Maxillipeden die Mundwerkzeuge. Zur Nahrungsaufnahme können außerdem noch die zweite Antenne und die ersten Peraeopoden (Thorakopoden) mit einbezogen werden. Die gleiche Bandbreite

an beißenden, leckenden, stechenden und saugenden Mundwerkzeugen, wie sie bei den Insekten vorkommen, findet sich auch bei den Copepoden, nur dass wegen des wässrigen Mediums noch filtrierende oder suspensionsaufnehmende Mundwerkzeuge hinzukommen. Stechende Mundwerkzeuge finden sich bei Copepoden genauso häufig wie bei Insekten, da Ektoparasiten in beiden Arthropodengruppen nicht selten auftreten. Die Formenvielfalt im Bau der Mundwerkzeuge von Copepoden ist schier unerschöpflich. In der Tiefsee gibt es das Phänomen, dass quer durch verschiedene Gruppen der Harpacticoiden die Männchen ihre Mundwerkzeuge reduzieren oder überhaupt nicht mehr ausbilden (Hake, 2002; Dreswes, 2005). Sie sind anscheinend nur noch flinke Spermaträger auf der stetigen Suche nach Weibchen, welche über voll ausgebildete Mundwerkzeuge verfügen und normal Nahrung aufnehmen, um Energie für die Eiproduktion und -ablage zur Verfügung zu haben.

Bei allen Kriterien, die sowohl absoluten als auch relativen Erfolg ausmachen, können Copepoden durchaus mit Insekten mithalten, nur nicht bei der Zahl der Arten. Auch wenn es vermutlich mehr als 450.000 Copepodenarten in den Ozeanen geben könnte, von denen bisher nur 12.500 bekannt sind, so stehen ihnen doch 925.000 bekannte Insektenarten gegenüber. Die totale Artenzahl der Insekten auf der Erde beläuft sich je nach Schätzung auf 5 bis 30 Millionen (Erwin, 1982; Stork, 1988; May, 1996; Gleich et al., 2000; Grimaldi und Engel, 2005). Ein Grund für diesen evolutiven Erfolg ist sicherlich, dass Insekten mit die ersten Tiere waren, die das Festland einschließlich des Luft-raums erfolgreich besiedelt und später eine enge Koevolution mit Pflanzen, Pilzen oder anderen Organismen durchgemacht haben. Pflanzen erhöhen unter anderem deutlich die Strukturvielfalt terrestrischer Lebensräume, wie es im marinen Bereich nur Korallenriffe annähernd vermögen. Copepoden dagegen mussten sich in einem Lebensraum durchsetzen, der von Anbeginn ihrer Entwicklung schon durch andere Tiere dicht besiedelt war.

Ein Meiobenthologe ist es gewohnt, große Mengen Copepoden zu erhalten, wenn er an der Küste, zum Beispiel an einem Strand, eine ganz normale Probe nimmt. Auch im Süßwasser ist es sicher nichts Besonderes, auf große Ansammlungen von Copepoden zu stoßen. Diese jedoch in Waldböden zu finden, ist schon

etwas überraschend. Können zwei Lebensräume wie Meeressand und Laubstreu, die auf den ersten Blick unterschiedlicher nicht sein können, aus der Sicht von Copepoden dennoch Gemeinsamkeiten aufweisen? Es macht auf jeden Fall einen Teil des Erfolges der Copepoden aus, dass sie in der Lage sind, eine breite Palette unterschiedlichster Lebensräume zu besiedeln.

### **Copepoden in der Laubstreu von Wäldern**

Es gibt nur wenige Berichte über Copepoden, die in der Laubschicht von Wäldern leben. Im Laufe der letzten Jahrzehnte sind es vorwiegend Randnotizen gewesen, die von Copepoden berichten, die in semi-terrestrischen Lebensräumen gefunden wurden und dort anscheinend überdauern (Reid, 1989). Vor allem Berichte von ungewöhnlichen Fundorten wie Laubstreu in den Wäldern Neuseelands (Harding, 1958) oder Australiens (Dendy, 1895), Tundrawiesen Kanadas (Bliss et al., 1973), Böden der Anden (Strum, 1978) und Marschböden Brasiliens (Reid, 1984) ließen die Funde als vereinzelte kuriose Entdeckungen erscheinen. In Japan demonstrierte schließlich Kikuchi (1984), dass *Moraria*-Arten in den dortigen Wäldern weit verbreitet sind und einen wichtigen Bestandteil der Bodenfauna darstellen. In Europa wurden immer wieder einzelne Randnotizen zu diesem Thema in beschreibenden Beiträgen verfasst. Die ersten stammen von Gurney (1932), Remy (1932) und Scourfield (1939). Die Arbeit von Nielsen (1966) war die erste ökologische Studie über semi-terrestrische Copepoden, die in der Streuschicht dänischer Buchenwälder leben.

Die Art *P. viguieri*, die in der Einführung bereits erwähnt wurde, ist dafür bekannt, dass sie die Laubschicht von Wäldern besiedeln kann und galt deswegen lange Zeit als eine von wenigen Ausnahmen. In älteren Werken wird oft auch die Art *Canthocamptus staphylinus* als ein typisches Beispiel für eine semiterrestrische Art genannt, die in Waldböden vorkommen soll. Dies lässt sich gegenwärtig jedoch nicht bestätigen, da sie nach neueren Untersuchungen dort überhaupt nicht vorkommt. In jüngerer Zeit hat Christian (2002, 2004) dem Vorkommen von Copepoden in österreichischen Waldböden einige Aufmerksamkeit gewidmet und festgestellt, dass dort neun Arten mehr oder weniger regelmäßig anzutreffen sind (Tabelle 1).

**Tabelle 1: Zusammenfassung der Studien von Christian (2004) zur Präsenz von Copepoden in österreichischen Waldböden.**

Vorkommen in:	Ganzjährig staunasse Böden	Eichen- (Misch-) Wald	Buchen- (Misch-) Wald	Buchen- Nadelholz- Mischwald	Parks
<i>Attheyella crassa</i>	+	–	4,0%	–	–
<i>Bryocamptus minutus</i>	+	–	4,0%	–	–
<i>Bryocamptus pygmaeus</i>		10,3%	16,0%	22,0%	–
<i>Epactophanes richardi</i>		10,3%	28,0%	33,0%	–
<i>Maraenobiotus vej dovskyi</i>	+	58,6%	60,0%	11,1%	–
<i>Moraria poppei</i>		–	–	66,7%	–
<i>Moraria varica</i>		6,9%	4,0%	–	–
<i>Paracyclops fimbriatus</i>		–	4,0%	–	–
<i>Phyllognathopus viguieri</i>		3,4%	–	–	4,5%

Es zeichnet sich ab, dass einige Arten wie *Attheyella crassa*, *Bryocamptus minutus* oder *Paracyclops fimbriatus* eher sporadisch in ganzjährig staunassen Waldböden auftauchen (Tabelle 1). Sie besiedeln diesen semiaquatischen Lebensraum wie andere aquatische Lebensräume auch und zählen nicht zu den regelmäßigen Bewohnern von wechselfeuchter Laubstreu. Echte semiterrestrische Arten, die in der Laubstreu hohe Dichten erreichen, sind nach Christian (2004) nur drei der neun in österreichischen Waldböden festgestellten Arten. Besonders häufig in Laub- und Nadelmischwald ist die Art *Maraenobiotus vej dovskyi*, gefolgt von *Epactophanes richardi* und *Bryocamptus pygmaeus* (Tabelle 1). Diese drei charakteristischen Streuschichtbewohner wurden bereits 1943 von Klie in französischen Wäldern gefunden. Weitere Nachweise dieser Arten aus britischen und irischen Wäldern liegen vor (Gurney, 1932; Stout, 1963).

*M. vej dovskyi* ist eine Kaltwasserart, die genau wie *E. richardi* in kleinen Wasseransammlungen auftritt, aber vor allem in Moosen vorkommen soll (Janetzky et al., 1996). *E. richardi* ist außerdem seit längerem als ein regelmäßiger und dominanter Bewohner (28.000 Individuen pro m<sup>2</sup>) der feuchten Streuschicht in Rotbuchenwäldern bekannt (Nielsen, 1966). Dieser Art wird eine semiterrestrische Lebensweise bescheinigt, da sie ähnlich wie *P. viguieri* das Potential hat, fast jede Wasseransammlung zu besiedeln.

Im Nadelholzmischwald erreicht noch *Moraria poppei* als eine vierte echt semiterrestrische Art eine deutliche Dominanz in der Zersetzergemeinschaft. Sie lebt ansonsten in Moosen

und Tümpeln, wobei ein geringer pH-Wert anscheinend ausschlaggebend für ihr Vorkommen ist. Die ähnliche Art *Moraria brevipes* wurde von Christian (2004) nicht gefunden, obwohl sie auch in Österreich vorkommen soll. In Fichtenforsten des Böhmerwaldes wurde sie dagegen bei einer weiteren Studie (Háněl und Christian, 2004) in ausgesprochen hohen Dichten von 2000 Individuen pro 10 cm<sup>2</sup> nachgewiesen. Beide *Moraria*-Arten kommen außer in der Laubstreu ebenfalls in kleinen Wasseransammlungen sowie in nassen Moosen vor. Dabei vermehren sie sich in der kalten Jahreszeit mit einer Generation pro Jahr (Røen, 1957), wobei die Entwicklungszeit bis zu den erwachsenen Tieren circa sieben Monate dauern kann.

Fiers und Ghenne (2000) untersuchten einige Jahre zuvor großflächig einige Böden Belgiens auf das Vorkommen semiterrestrischer Copepoden. In 85% der von ihnen untersuchten Waldstandorte wurden Copepoden angetroffen. Sie fanden insgesamt zwölf Copepoden-Arten, die regelmäßig in der Laubstreu dortiger Wälder anzutreffen waren. Die häufigsten Vertreter gehören den Gattungen *Moraria* und *Bryocamptus* an. In 35 Standorten waren *Moraria*-Arten die einzigen Copepoden, bei den *Bryocamptus*-Arten war das nur bei sechs Standorten der Fall; in 14 Standorten kamen jedoch sowohl *Moraria*- als auch *Bryocamptus*-Arten gemeinsam vor. Diese Ergebnisse ergänzen in hervorragender Weise die Beobachtungen von Christian (2004). Auch wenn Fiers und Ghenne (2000) die Arten *P. fimbriatus* und *A. crassa* nicht wie Christian (2004) in der Laubstreu von Wäldern nachweisen konnten, so wurden sie von ihnen dennoch in nassen

**Tabelle 2: Zusammenfassung der Studien Fiers und Ghenne (2000) zur Präsenz von Copepoden in belgischen Wäldern.**

Vorkommen im Baumbestand von:	Ahorn	Birke	Hainbuche	Rotbuche	Kirsche	Weide	Ulme
<i>Diacyclops crassicaudis</i>						+	
<i>Bryocamptus pygmaeus</i> *						+	
<i>Bryocamptus typhlops</i>			+	+			
<i>Bryocamptus weberi</i>		+				+	
<i>Elaphoidella gracilis</i>		+					
<i>Epactophanes richardi</i> *				+			
<i>Graeteriella unisetigera</i>		+		+		+	
<i>Maraenobiotus vejdoovskyi</i> *				+			
<i>Moraria brevipes</i>		+			+		
<i>Moraria poppei</i>	+		+	+		+	
<i>Moraria varica</i> *	+	+		+		+	+
<i>Nitocra spec.</i>		+					

\*diese Arten wurden auch von Christian (2004) in österreichischen Wäldern gefunden, siehe Tabelle 1.

Wiesen gefunden. Es wurde außerdem der Versuch unternommen, die einzelnen Arten bestimmten Waldböden und damit Vegetationsgemeinschaften zuzuordnen (Tabelle 2). Leider machen Fiers und Ghenne (2000) keine Angaben, in welchen Dichten die Copepoden dabei vorkommen. Sie weisen jedoch daraufhin, dass Boden bewohnende Copepoden mit Methoden, wie sie herkömmlich zur Erfassung der Bodenmesofauna angewendet wurden und zum Beispiel bei Nematoden gut funktionieren, nicht ausreichend nachgewiesen werden können.

Die Dichte, die Copepoden in Waldböden tatsächlich erreichen können, ist erstaunlich. Arbeiten, die von Bodenkundlern bei der Erhebung der Bodenfauna durchgeführt wurden, deuten auf ein weitreichendes Vorkommen und eine wichtige Rolle der Copepoden hin. So wurden in Buchenwäldern bei Göttingen und des Solling 3000–4000 Copepoden-Individuen (Harpacticoiden) pro Quadratmeter gefunden (Schauerermann in Schaeffer, 1991). In böhmischen Fichtenwäldern sind es sogar >200.000 Individuen, die dort die Streuschicht besiedeln (Háněl und Christian, 2004). Vergleicht man diese Dichte mit Literaturangaben zum Vorkommen von Tieren der Bodenmesofauna in der Streuschicht von Wäldern (Tabelle 3), so kann man sagen, dass Copepoden unter den Bedingungen einer ausreichenden Bodenfeuchte durchaus zu den dort am häufigsten anzutreffenden Tieren gehören können. Laubstreu bewohnende Copepoden können mit ihrer Individuenzahl sogar so charakteristische Boden-

**Tabelle 3: Angaben zur durchschnittlichen Individuendichte von Tieren der Bodenmesofauna in Waldböden bezogen auf einen Quadratmeter (Ehrensberger, 1993).**

Fadenwürmer (Nematoda)	8.000.000
Milben (Acari)	200.000
Springschwänze (Collembola)	100.000
Enchytraeiden (Annelida)	150.000

bewohner wie Springschwänze übertreffen und ziehen in dieser Kategorie mit den außerordentlich artenreichen Bodenmilben gleich. Es mangelt schlicht an Nachweisen, denn sie werden anscheinend generell bei Untersuchungen nicht beachtet oder übersehen. Sobald man jedoch gezielt nach ihnen in der Streuschicht sucht, wird ein jeder schnell und überall dort fündig, wo ausreichend Bodenfeuchte vorhanden ist. So verwundert es nicht, das Harding (1958) zwei neue Arten beschrieben hat, die aus Buchenwäldern Neuseelands stammen.

Interessanterweise werden alle Copepoden-Arten, die die Laubstreu besiedeln, auch mehr oder weniger regelmäßig im Grundwasser angetroffen (Schminke, 2006). Das gilt insbesondere für die Arten der staunassen Böden wie *Paracyclops fimbriatus*. Die dritte *Moraria*-Art, *Moraria varica*, die von Christian (2004) nur sporadisch im Eichen- oder Buchenwald gefunden wurde, soll sogar in erster Linie ein Grundwasserbewohner sein (Noll und Stammer, 1953). Die Voraussetzungen für die Besiedlung von Laubstreu durch Copepoden ist anscheinend die große Anpassungsfähigkeit der hier

vorgestellten Arten. Ihr Auftreten im Grundwasser ist nicht außergewöhnlich, wenn man bedenkt, in welchen Dichten diese Copepoden in den oberen Bodenschichten vorkommen können. Sie werden durch Niederschläge eingeschwemmt oder können bei hohen Grundwasserständen direkt zwischen beiden Lebensräumen wechseln.

### **Harpacticoiden der Laubstreu**

Harpacticoiden sind Copepoden mit überwiegend benthischer (Boden bewohnender) Lebensweise. Die Gattung *Bryocamptus* umfasst 16 in Mitteleuropa vorkommende Arten, die fast alle von kleiner, gedrungener und fast zylindrischer Gestalt sind (Abb. 1a). Ihre Segmentgrenzen sind mit kleinen Kutikularstachelreihen besetzt. Das Hinterende trägt zwei Paar Furkalborsten; das längere Paar ist so lang wie das Abdomen. Die Naupliusaugen sind leuchtend hellrot pigmentiert. Etliche Arten der Gattung kommen in kleinen und kleinsten Wasseransammlungen vor. Dazu gehört auch nasses Moos, dem die Gattung ihren Namen verdankt. Denn *Bryocamptus* leitet sich von der Bezeichnung Bryales für Laubmoose ab (Janetzky et al., 1996). Einige Arten werden auch in feuchter Laubstreu angetroffen, insbesondere *B. pygmaeus* (Tabelle 1).

Die Weibchen von *B. pygmaeus* haben eine Körperlänge von 0,4–0,7 mm. Die Männchen sind deutlich kleiner (Abb. 1b), sie sind nur 0,3–0,5 mm lang. Unverwechselbares Merkmal der Männchen sind die extrem kräftigen Außenranddornen (Abb. 2a) am letzten Glied des Exopoditen (Außenast) des zweiten Peraeopoden (Schwimmbein) (Janetzky et al., 1996). Einige der sieben Borsten des plättchengleichen Exopoditen des weiblichen fünften Peraeopoden (Abb. 2f) sind deutlich länger als die fünf Borsten des Basoendopoditen (basaler Anhang). Der fünfte Peraeopod der Männchen hat eine andere Struktur; er ist kleiner mit weniger und kürzeren Borsten. Dafür haben Männchen noch Reste des sechsten Peraeopoden (Abb. 2g). Ein dünner Wasserfilm auf oder zwischen Falllaub, Moosblättern oder Sandkörnern reicht diesen Harpacticoiden aus. Ja, sogar die Blattscheiden der Waldsimse *Scirpus sylvaticus* werden von Exemplaren besiedelt (Janetzky et al., 1996). Bei *B. pygmaeus* haben die kurzen gedrungenen Peraeopoden generell kräftige

Außenranddornen (Abb. 2a, b). Mit diesen Dornen finden sie auf jedem Untergrund Halt und können die Kapillarkräfte des Wasserfilms, in dem sie sich bewegen, leicht überwinden. *B. pygmaeus* ist eine sehr weit verbreitete und ausgesprochen häufige Art, die aufgrund ihrer hohen Anpassungsfähigkeit in allen aquatischen und semiaquatischen Lebensräumen vorkommt. Wie Untersuchungen der letzten Jahre zeigen, ist sie auch die dominierende Art im nassen Laub bodenfeuchter norddeutscher Niederungswälder und kommt sowohl in Eichen- als auch in Buchenwäldern gleichermaßen recht häufig vor (Tabelle 1 und 3).

Ihre Weibchen (Abb. 1b) tragen einen einzigen großen Eisack (Abb. 1f) mit sich herum, in dem 8–16 Eier durch eine Kittsubstanz miteinander verklebt sind. Bei der Begattung kommen keine Post- wohl aber eine Präkopula-Phase vor. In der Präkopula-Phase würde sich das Männchen ein noch nicht geschlechtsreifes weibliches Copepodid greifen und bis zu dessen endgültiger Erwachsenenhäutung festhalten. Bei *B. pygmaeus* werden, wie bei allen Arten der Gattung, nur ausgewachsene aber noch unbegattete Weibchen von den Männchen an den langen Furkalborsten ergriffen. Beide Geschlechter bilden für die Dauer der Begattung und Eisackbildung ein charakteristisches Gespann, das so genannte Tandem (Abb. 1b). Die unverzweigte erste Antenne (Abb. 2e) der Männchen ist nicht so deutlich zu einem Greiforgan transformiert wie beispielsweise bei den hier behandelten männlichen Cyclopoiden (Abb. 3a). Die Männchen umgreifen die Furkalborsten der Weibchen mit der ersten Antenne (Abb. 1d). Das festklammernde Männchen versucht nun sein eingekapseltes Samenpaket (Spermatophore, Abb. 1e) zu übertragen, indem es seinen Hinterkörper (Abdomen) immer wieder ruckartig nach vorne krümmt, bis das Samenpaket an der Geschlechtsöffnung der Weibchen sicher befestigt ist. Die Spermien werden durch eine Substanz im Samenpaket, die durch den Kontakt mit Wasser aufquillt, aus der Samenkapsel in den weiblichen Geschlechtstrakt gedrückt. Nach der erfolgreichen Begattung verbleibt das Tandem in der Postkopula-Phase, denn die Männchen halten die Weibchen noch einige Zeit nach der Begattung fest, bis sie den Eisack gebildet haben; danach lösen sie sich. Mit diesem Postkopula-Verhalten verhindern die Männchen, dass andere Männchen die Weibchen greifen und diese nochmals begatten.

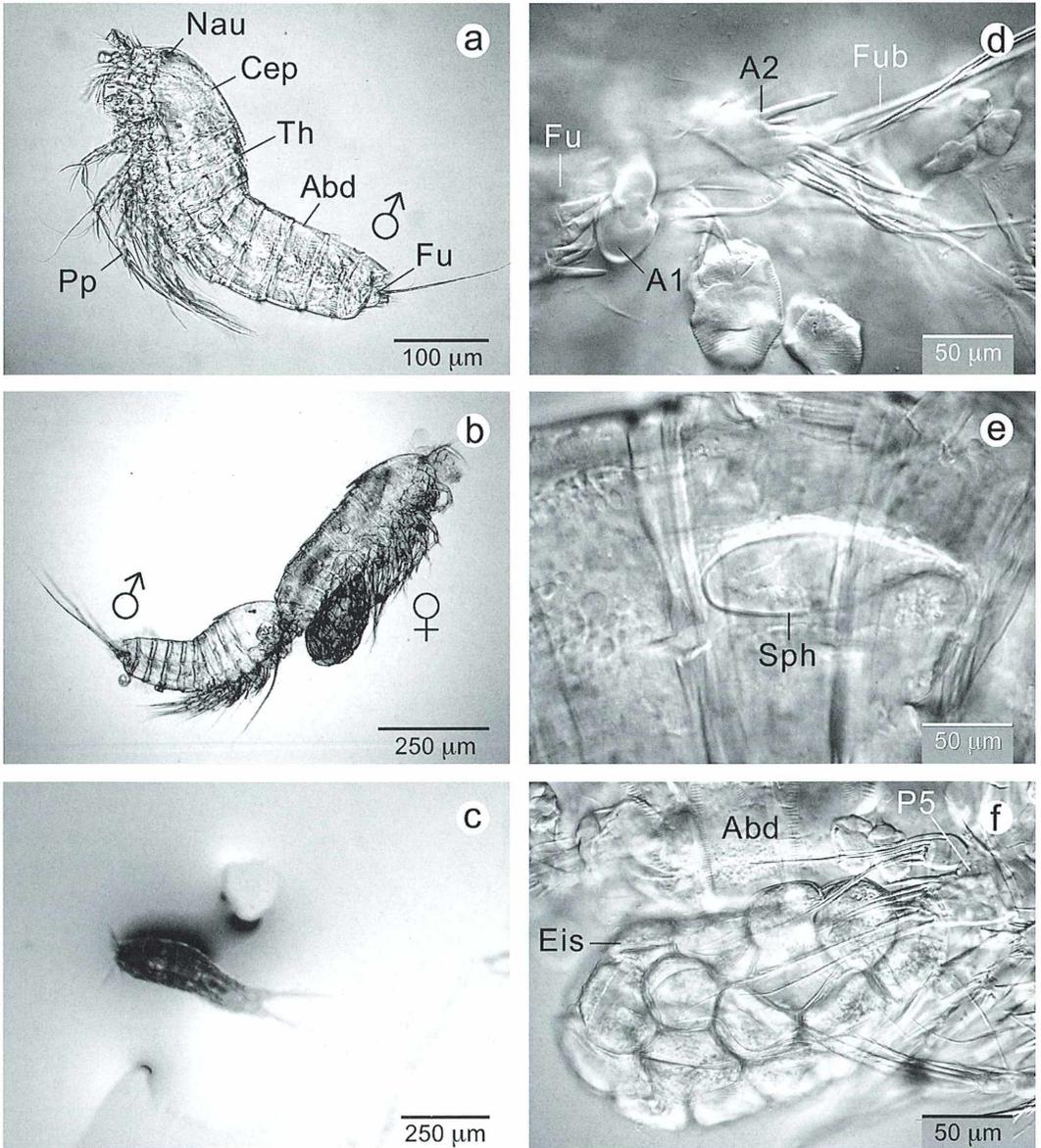


Abb. 1: *Bryocamptus pygmaeus*. a Habitus des Männchens, Abdomen (Abd), Cephalothorax (Cep), Furka (Fu), Naupliusauge (Nau), Peraeopod (Pp), Thorax (Th). b Tandem, das kleinere Männchen (links) und das größere Weibchen (rechts) in der Postkopula-Phase. c Männchen bei der Fortbewegung im Wasserfilm. d Das Männchen umgreift während der Postkopula mit der ersten Antenne (A1) die Furkalborsten (Fub) des Weibchens; A2 zweite Antenne. e Reife Spermatophore (Sph) im Abdomen des Männchens. f Einzelner Eisack (Eis) des Weibchens am Abdomen (Abd), flankiert vom fünften Peraeopoden (P5); a, b, d–f Seitenansichten, c Aufsicht. Differentieller Interferenzkontrast (DIK).

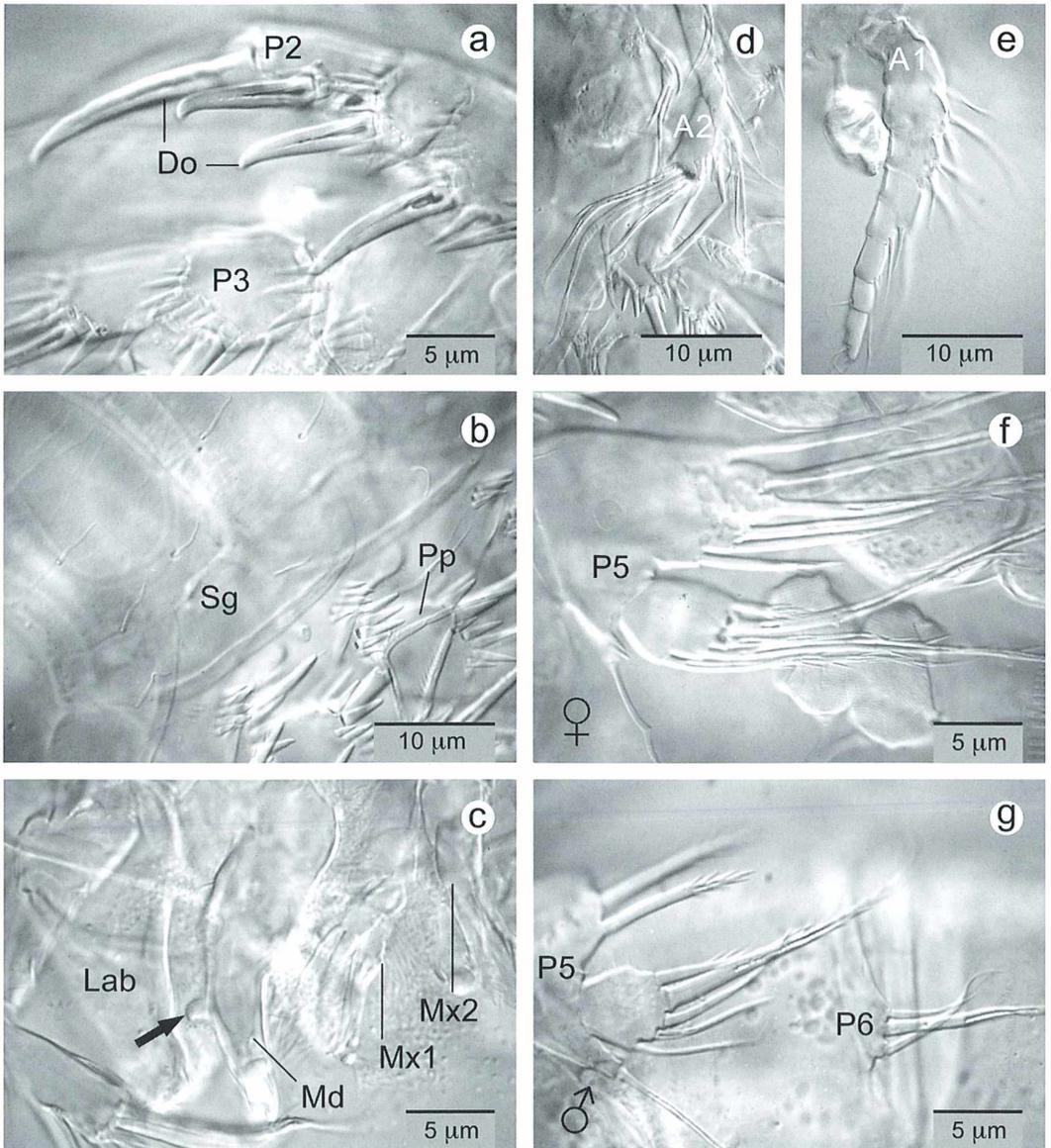


Abb. 2: *Bryocamptus pygmaeus*. a Zweiter Peraeopod (P2), darunter dritter Peraeopod (P3) des Männchens mit extrem großen Außenranddornen (Do). b Rumpfsegmente (Sg) und dornenreiche Peraeopoden (Pp). c Labrum und Mundwerkzeuge (Lab), Mandibel (Md) mit auffälligem Zahn (Pfeil) in der Kauleiste, erste Maxille (Mx1), zweite Maxille (Mx2). d Zweiästige zweite Antenne (A2). e Einästige erste Antenne (A1). f Fünfter Peraeopod (P5) des Weibchens. g Leicht reduzierter fünfter (P5) und stark reduzierter sechster (P6) Peraeopod des Männchens. a–g Seitenansichten (DIK).

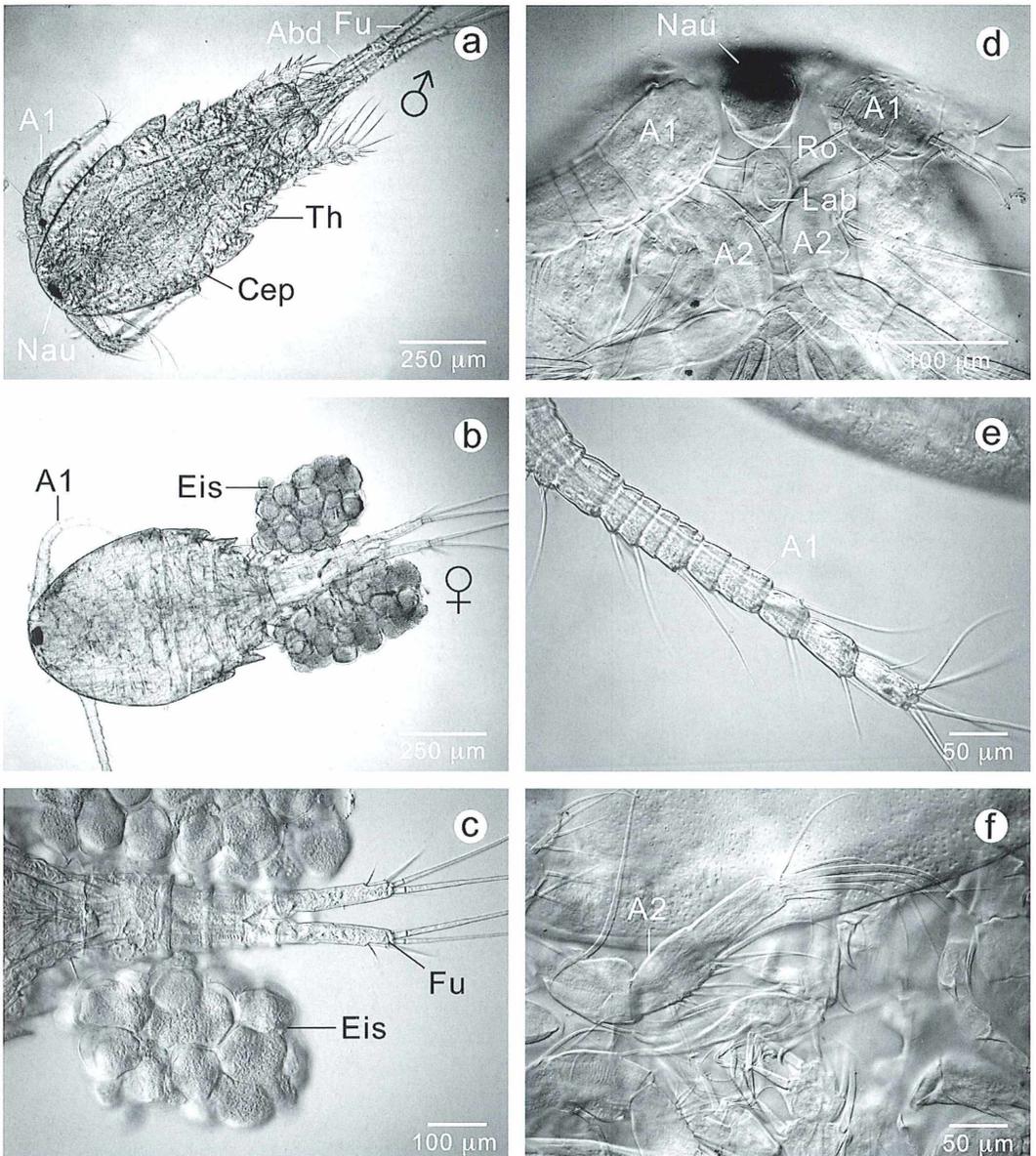


Abb. 3: *Diacyclops bisetosus*. a Habitus des Männchen mit zum Greiforgan umgewandelter erster Antenne (A1), Cephalothorax (Cep), Furka (Fu), Naupliusauge (Nau), Thorax (Th). b Habitus des Weibchen mit normaler erster Antenne (A1) und paarigem Eisack (Eis). c Furka (Fu) und Eisack (Eis). d Kopfende Männchen mit erster Antenne (A1), zweiter Antenne (A2), Labrum (Lab), Naupliusauge (Nau) und Rostrum (Ro) bzw. Kopfvorsprung. e Einästige normale erste Antenne (A1) des Weibchens. f Zweistöckige zweite Antenne (A2). a-f Bauchansichten (DIK).

*Bryocamptus*-Arten, die temporäre Lebensräume besiedeln, haben verschiedene Anpassungen, um ungünstige Umweltbedingungen wie das Austrocknen ihrer Umgebung zu überstehen. Anscheinend spielen Dauereier und die Ausbildung von Zysten dabei eine entscheidende Rolle. Aber auch in ihrem Verhalten haben sie sich dem Leben in Laubstreu beziehungsweise Moos angepasst. In kleinen Gefäßen kann man beobachten, wie einige Exemplare von *B. pygmaeus* immer wieder auf den Rand zustreben. Sie schwimmen dann parallel zum Rand, wobei einige Exemplare wiederholt die Wasseroberfläche halb schwimmend, halb kriechend für einige Sekunden durchbrechen. Wenn dies geschieht, führen sie stets einen dünnen Wasserfilm mit sich. Noch intensiver wird dieses Verhalten, wenn man einzelne Exemplare in einen großen Wassertropfen überführt, der auf einem Objektträger platziert wurde. Das langsame Austrocknen des Wassertropfens stimuliert die Harpacticoiden an dessen Rand immer wieder Kurven zu schlagen. Dabei wird der Tropfen kurz verlassen und ein Teil davon als Wasserfilm mitgenommen (Abb. 1c). Der schwindende Tropfen veranlasst sie schließlich dazu, diesen in einem gradlinigen Sprint endgültig zu verlassen, wobei sie einen langen Wasserfaden so weit wie möglich hinter sich her ziehen. Dieses Verhalten ist in der natürlichen Umgebung, der Laubstreu, eine Maßnahme, um auch in mäßig feuchtem Laub zu überleben, da so immer wieder Anschluss an den noch verbliebenen Wasserfilm gesucht und gefunden wird. Die Cyclopoiden, die nur in richtig durchnässtem Laub vorkommen, zeigen dieses Verhalten nicht.

Was ihre Ernährung angeht, sind Harpacticoiden wie *B. pygmaeus* recht flexibel. Mit ihren kräftigen Mandibeln oder Kauladen (Abb. 2c) können sie auch feste Nahrungsbrocken zerkleinern. Je nach bewohntem Laub haben sie eine andere Färbung. Exemplare aus Rotbuchenlaub haben eine rötliche Darmfüllung, während Exemplare aus Eichenlaub eine eher dunkelbraune aufweisen. Anscheinend wird Blattmaterial abgenagt, das von Bakterien durchsetzt ist und so verdaubare Bestandteile freisetzt. Denkbar wäre auch, dass die Humusbestandteile des Laubes mit Hilfe von Darmbakterien oder direkt aufgenommen und verdaut werden. Cellulose aufspaltende Enzyme wurden bisher bei keiner Art nachgewiesen, jedoch soll *E. richardi* Enzyme produzieren, die

es der ebenfalls im Rotbuchenlaub vorkommenden Art ermöglichen, Pectin und Amylose zu verdauen (Nielsen, 1966). Allerdings wird auch organisches Material wie zum Beispiel Reste gestorbener Tiere der Bodenmesofauna verzehrt. Bei Gelegenheit werden auch lebende, kleinere Organismen als Nahrung angesehen und gefressen, besonders gern kleine Nematoden.

### Cyclopoiden in der Laubstreu

Bei Cyclopoiden (auch Hüpfertlinge genannt) handelt es sich um Copepoden, die sowohl eine planktische als auch eine benthische Lebensweise führen. Dass Vertreter der Cyclopoiden wie *Diacyclops bisetosus* (Abb. 3a, b) ganzjährig in periodischen Kleingewässern, die kurzfristig entstehen und rasch wieder verschwinden, auftreten, ist nicht außergewöhnlich (Einsle, 1993). Die meisten der 50 Arten der Gattung *Diacyclops* haben nämlich die Fähigkeiten, das Austrocknen ihrer Wohngewässer zu überdauern. Die Wasserqualität spielt dabei keine Rolle, sowohl moorige als auch brackige Kleintümpel werden von ihnen besiedelt. Erstaunlich ist, dass diese tropfenförmigen Copepoden, die meistens eine planktische Lebensweise führen (Gruner et al., 1993; Einsle, 1993), genauso wie Harpacticoiden im nassen Laub von Waldböden vorkommen. Ihnen reicht ebenfalls ein Wasserfilm zwischen verrottem Laub aus, um dort zu leben. Man kann in Kulturgefäßen beobachten, dass sich *D. bisetosus*, wie für Cyclopoiden charakteristisch, rasch und sprunghaft durch die Wassersäule fortbewegt. Bei ihnen sind die Intercostalplatten (Abb. 4d) gut ausgebildet, welche die Peraeopoden basal verbinden und so aus zwei Beinen eine funktionelle Einheit für das Schwimmen machen. Zeitweise tauchen *D. bisetosus* immer wieder zwischen die Detritusflocken ab, die sich zwischen den Blättern ansammeln und nach dem Ausspülen den Boden des Kulturgefäßes bedecken. Zwischen den Detritusflocken wühlen sie herum und suchen nach Nahrung, genau wie es sich bei Harpacticoiden beobachten lässt. Mit der Häutung vom letzten Stadium der Nauplius-Larve zum ersten Copepodid sind die Mundwerkzeuge voll ausgebildet, die zum Ergreifen und Kauen der Nahrung dienen. Generell leben Cyclopoiden von gemischter Kost. Die Nahrung von *D. bisetosus* besteht unter

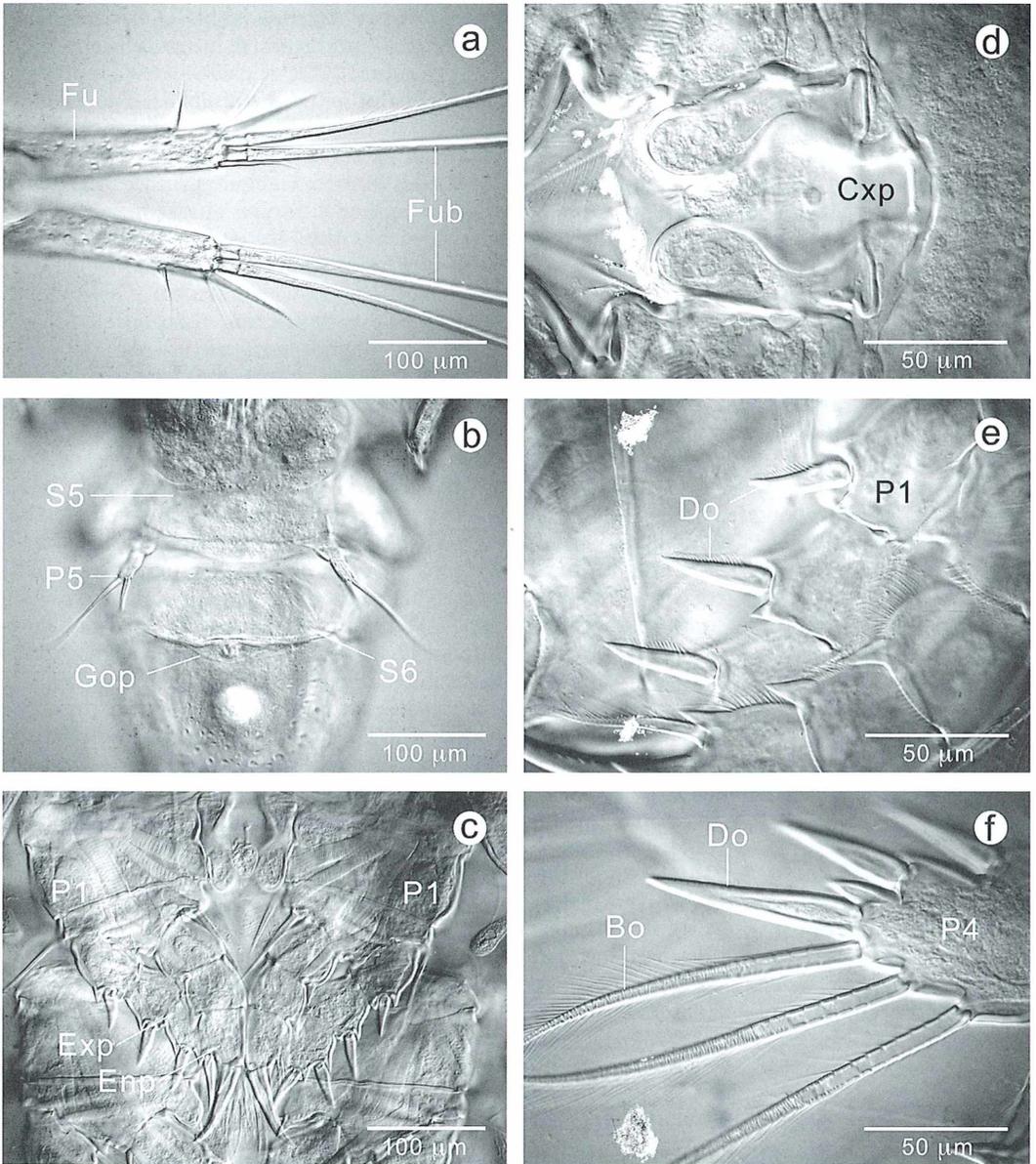


Abb. 4: *Diacyclops bisetosus*, Weibchen. a Furka (Fu) mit den langen endständigen Furkalborsten (Fub). b Bereich des Genitalsegments (S6) mit Genitaloperkulum (Gop) oder Genitaldeckel und kleinem zweigliedrigem fünften Peraeopoden (P5) am fünften Segment (S5). c Kräftige erste Peraeopoden (P1), Exopodit (Exp) und Endopodit (Enp) mit dornenreicher Bewehrung. d Intercoxalplatte (Cxp), die basal beide Peraeopoden zu einer Einheit verbindet. e Kräftige Außenranddornen (Do) des ersten Peraeopoden (P1). f Exopodit des vierten Peraeopoden (P4) mit kurzen abgeplatteten Außenranddornen (Do) und langen gefiederten Innenrandschwimmborsten (Bo). a-f Bauchansichten (DIK).

anderem aus den genießbaren Bestandteilen der Detritusflocken, die genauso selektiv aufgelesen werden wie einzellige Algen, welche die mehr planktisch lebenden Cyclopoiden in der freien Wassersäule einfangen. Von anderen Cyclopoiden ist bekannt, dass sie anderen Kleinkrebsen, Rädertierchen oder Ciliaten nachstellen, die im gleichen Lebensraum vorkommen, und auch die eigenen Nauplien sind vor den Erwachsenen nicht sicher.

*D. bisetosus* scheint die gleiche Fähigkeit wie *B. pygmaeus* zu besitzen, sich auch in einem dünnen Wasserfilm fortzubewegen. Dabei sind ihm ebenfalls die mit kräftigen Dornen bewehrten Außenkanten der ersten Peraeopoden (Abb. 4c, e) hilfreich, mit denen er genau wie *B. pygmaeus* guten Halt auf dem Untergrund bekommt. Dieses morphologische Detail weisen anscheinend alle Copepoden auf, welche die Laubstreu bewohnen. Die Innenkanten der Peraeopoden weisen statt der Dornen lange, durch Härchenbesatz fein gefiederte Borsten auf (Abb. 4f), die dem Schwimmen in der Wassersäule dienen.

*D. bisetosus* ist in Deutschland relativ häufig anzutreffen. Sie gilt als eine weltweit verbreitete (kosmopolitische) Art, wahrscheinlicher jedoch ist, dass es sich, wie so oft bei planktischen Cyclopoiden, um einen Komplex mehrerer nah verwandter Arten handelt. Lebende Exemplare von *D. bisetosus* haben eine dunkle, kontrastreiche Marmorierung des tropfenförmigen Rumpfes und dunkel rubinrot leuchtende Naupliusaugen (Abb. 3d). Die dunkle Zeichnung macht sie undurchsichtig, und sie sind dadurch schlecht mit dem Mikroskop zu studieren. Frisch fixierte Exemplare, die in Glycerin überführt werden, verlieren dieses Muster. Ihre Organe klären in Minutenschnelle auf und lassen sich so gut erkennen, wie die Abbildungen 3a und b zeigen. Die Körperlänge ist recht variabel und schwankt je nach studierter Population zwischen 0,9 und 1,4 mm, wobei Weibchen (Abb. 3b) in der Regel etwas größer sind als Männchen (Abb. 3a). Bei den meisten Cyclopoiden lassen sich in erster Linie die Weibchen zuverlässig bestimmen, da deren Glieder der ersten Antenne im Gegensatz zu denen der Männchen relativ gleichmäßig, fast rechteckig geformt sind (Abb. 3e). Die einzelnen Antennenglieder der Männchen (Abb. 3a) sind wesentlich komplizierter und unregelmäßig gestaltet, da sie ein Greiforgan bilden, mit dem die Weibchen zur Paarung ergriffen wer-

den. Die erste Antenne ist bei *D. bisetosus* arttypisch lang und setzt sich aus siebzehn Gliedern zusammen. Sie reicht bis zum Hinterrand des Cephalothorax (Kopfschild). Die Flanken des vierten Segmentes des Mittelkörpers (Thorax) sind zu seinem Ende hin abgerundet. Die Enden des fünften Segmentes sind seitlich leicht flügelartig nach hinten ausgezogen. Das Genitalsegment (Abb. 4b) ist fast so breit wie das vorherige Segment und trägt einen kleinen ovalen, unauffälligen Genitaldeckel (Genitaloperculum). Die arttypischen, reduzierten fünften Peraeopoden sind zweigliedrig (Abb. 4b). Das breite Basalglied trägt eine Innenrandborste, das schlanke Endglied trägt zwei weitere Borsten.

Mit ihrer transformierten ersten Antenne greifen die Männchen die Weibchen, vorzugsweise an den langen kräftigen Furkalborsten (Abb. 4a), aber auch an anderen Körperteilen und heften sofort ihr Samenpaket an deren Genitalfeld. Nach der erfolgreichen Begattung lassen sie die Weibchen sogleich wieder los, eine Postkopula-Phase wie bei den Harpacticoiden kommt bei ihnen nicht vor. Die Weibchen der Cyclopoiden tragen typischerweise zwei große Eisäckchen (Abb. 3c) so lange mit sich herum, bis die Larven schlüpfen.

Eine weitere Cyclopoiden-Art, *Paracyclops fimbriatus*, tritt in ähnlichen Lebensräumen wie *D. bisetosus* auf. Sie wurde von Christian (2004) in der Laubstreu submontaner Buchenwälder gefunden. Dort aber stellt sie nur 4% der Copepoden-Fauna staunasser Böden. Sowohl *P. fimbriatus* als auch *D. bisetosus* sind in oberflächennahen Habitaten ausgesprochen häufig und haben eine große Anpassungsfähigkeit. *P. fimbriatus* wandert öfter und erfolgreicher ins Grundwasser ein als *D. bisetosus*, ist dafür aber in Moosen weniger häufig (Einsle, 1993; Gad, 2003; Schminke, 2006). Ein unverwechselbares Kennzeichen von *P. fimbriatus* gegenüber ähnlich aussehenden Arten sind die weit auseinander gerückten Furkaläste.

### Überdauerungsstrategie der Laubstreibewohner

Copepoden können in der Laubstreu von Wäldern nur dann leben, wenn genügend Wasser vorhanden ist. Handelt es sich um bodenfeuchte Wälder, so sind Arten wie *E. richardi* das ganze Jahr aktiv, und es finden sich Er-

wachsene und Nauplien-Larven sowohl im Winter wie auch im Sommer (Nielsen, 1966). Trocknet die Laubstreu in den Sommermonaten aus, müssen die Copepoden in andere Lebensräume ausweichen oder die Trockenheit überdauern. Alle Copepoden-Arten, die bisher in der Laubstreu gefunden worden sind, können auch im Grundwasser leben (Schminke, 2006). Der Baumbestand und die Bodenbildung von Wäldern sorgen ohnehin für oberflächennahe Grundwasserstände, sodass für Copepoden jederzeit die Option besteht, ins Grundwasser auszuweichen, wenn die oberen Bodenschichten für sie zu trocken werden. Außerdem eröffnet es ihnen Möglichkeiten Trockenperioden zu überdauern.

Von vielen kleinen wirbellosen Tieren wie Bärtierchen (Tardigrada), Rädertierchen (Rotatoria) oder Plattwürmern (Plathelminthes), die temporäre semiaquatische Lebensräume bewohnen, ist bekannt, dass sie zwei Eitypen produzieren können. Subitaneier, deren Entwicklung sofort einsetzt, werden normalerweise gebildet, wenn eine Population unter guten Umweltbedingungen lebt und im Wachstum begriffen ist. Verschlechtern sich die Umweltbedingungen zum Beispiel durch drohende Austrocknung, werden Dauereier produziert. Die Bildung solcher Dauereier ist bei *E. richardi* gut dokumentiert. Es gibt bei dieser Art sogar einen Generationswechsel (Heterogonie), wobei der Bau des Genitalfeldes der Weibchen davon abhängt, ob die Fortpflanzung auf parthenogenetischem (Produktion unbefruchteter Eier) oder bisexuallem (Produktion befruchteter Eier) Wege erfolgt (Nielsen, 1966). Dieser besondere Fortpflanzungsmodus gilt als eine Anpassung an mögliche Austrocknung der bewohnten Buchenstreu (Nielsen, 1966). Auch von *Bryocamptus*-Arten ist bekannt, dass sie zwei Eitypen produzieren können (Janetzky et al., 1996), unter anderem von den Weibchen von *B. pygmaeus*. Subitaneier haben eine blaugraue Eischale. Dauereier haben eine dickere rötliche Schale. Subitan- und Dauereier können auch gleichzeitig in nur einem Eisack vorkommen. Die Fähigkeit, Dauereier zu bilden, die Trockenheit, Winterkälte oder Sauerstoffmangel überstehen, ist generell bei heimischen Harpacticoiden weit verbreitet (Nielsen, 1966). Im Kontrast dazu ist die Produktion von Dauereiern bei Cyclopoiden bisher nicht eindeutig dokumentiert (Einsle, 1993; Dahms, 1994), obwohl keinesfalls auszuschließen ist, dass auch sie dazu in der Lage sind.

Bei etlichen Cyclopoiden überdauern die Jugendstadien oder Copepodide ungünstige Umweltbedingungen in Form von einer Diapause, beispielsweise den Winter am Grunde von größeren Seen. Die Jugendentwicklung wird durch die Tageslichtlänge (Photoperiodik) gesteuert und dadurch anscheinend auch die Diapause. Das aktuelle Nahrungsangebot hat darauf keinen Einfluss. Die Copepodide, die sich bewegungslos in der Diapause befinden, zeigen eine charakteristische Körperhaltung mit nach vorn gestreckten Schwimmbeinen und nach unten abgewinkeltem Abdomen (Einsle, 1993). Die Diapause wird beendet, wenn nach dem Sommer die Wohngewässer wieder aufgefüllt werden oder in größeren Seen die herbstliche Vollzirkulation einsetzt. Sommerliche Trockenperioden werden überdauert, indem sich die Copepodidstadien zu austrocknungsresistenten Zysten zusammenrollen. Die Copepodide können dafür eine spontane Häutung einleiten, bei der sie die alte Kutikulahülle, die Exuvie, nicht verlassen, sondern sie als Zystenhülle verwenden und in eine Trockenstarre fallen (Einsle, 1993; Janetzky et al., 1996). Diese Möglichkeit haben besonders Süßwasser-Cyclopoiden (Elgmork, 1980) aber auch einige Arten der Harpacticoiden (Dahms, 1994).

In der heimischen Fauna sind es vor allem Arten der Gattungen *Cyclops* und *Diacyclops*, bei denen enzystierende Copepodide vorkommen. Für die Populationsentwicklung von *D. bisetosus* spielen diese Dauerstadien anscheinend eine große Rolle. Bei den heimischen Harpacticoiden sind es in erster Linie Arten der Canthocamptidae wie die *Bryocamptus*-Arten, bei denen sie vorkommen (Dahms, 1994; Janetzky et al., 1996). Bei *Canthocamptus staphylinus* können sich auch erwachsene Tiere enzystieren. Bei Temperaturen über 12 °C und spezifischer Lichteinwirkung hören die Weibchen dieser Art auf, Eier zu produzieren. Dafür lagern sie kleine, orange Fettkörperchen ins Gewebe ein und bilden schließlich eine Zyste, indem sie eine primäre Zystenhülle aus körpereigenem Sekret abscheiden. Oft wird die primäre Zystenhülle von einer sekundären Zystenhülle umgeben, die aus feinem Detritus und anderem Material der Umgebung besteht (Janetzky et al., 1996). Die Fähigkeit, Zysten zu bilden, ist jedoch bei nur wenigen Arten nachgewiesen. Generell dürfte diese Fähigkeit viel weiter verbreitet sein, als bisher bekannt ist, da nur wenige Arten tatsächlich daraufhin untersucht

worden sind. Allerdings zeigt sich, dass selbst bei nahe verwandten Arten diese Fähigkeit recht unterschiedlich ausgebildet ist. Während bei der einen Art enzystierende Copepodide vorkommen, sind sie bei der anderen anscheinend nicht vorhanden. Außerdem scheint es so

zu sein, dass gerade bei Bewohnern temporärer, aperiodischer Klein- und Kleinstgewässer immer nur ein Teil der Population eine Fortpflanzungsperiode mit zur Diapause beziehungsweise Enzystierung befähigten Stadien abschließt (Einsle, 1993).



### Beobachtungen zur Überdauerung von Frost und Trockenheit

Um die Fähigkeiten von *B. pygmaeus* zu untersuchen, ungünstige Umweltbedingungen zu überdauern, wurden zwei Experimente durchgeführt: Das Einfrieren und das Austrocknen von Rotbuchen- und Eichenlaub, in dem diese Art häufig vorkommt. Da *B. pygmaeus* besonders den Winter über aktiv ist, in dem immer wieder Frostperioden den Boden gefrieren lassen, sollte man eine gewisse Resistenz dieser Harpacticoiden gegenüber dem Einfrieren erwarten. Das feuchte Laub wurde im Gefrierschrank über vier Tage bei  $-18^{\circ}\text{C}$  eingefroren und danach langsam wieder aufgetaut. Die Harpacticoiden erwiesen sich als nicht frostresistent, dafür umso mehr die Räder- und Bärtierchen. Schon wenige Stunden nach dem Auftauen waren Vertreter dieser Tiergruppen wieder aktiv. Der Frost scheint sogar ihre Dauerstadien aktiviert zu haben, denn es waren plötzlich deutlich mehr Räder- und Bärtierchen als in den Vergleichskulturen aktiv. Dabei ist zu beachten, dass der Fraßdruck durch die Copepoden wegfiel. Das Einfrieren hatten anscheinend nur die Dauereier von *B. pygmaeus* überlebt, denn erst nach einer Woche tauchten die ersten Nauplien wieder in den Kulturgefäßen auf.

Während des Austrocknungsexperiments wurde das Laub langsam im Verlauf einer Woche getrocknet und nach einer weiteren Woche wieder vernässt. Im Laubaufguss wurden unter gekühlten Bedingungen ( $5^{\circ}\text{C}$  wie im Freiland) bereits nach 24 Stunden die Räder- und Bärtierchen wieder aktiv. Frühestens nach einer Woche waren vereinzelt Exemplare von *B. pygmaeus* und *D. bisetosus* anzutreffen; es traten sowohl Copepodide als etwas später auch Nauplien auf. Da die Zystenbildung, wie beschrieben, hauptsächlich durch Lichteinwirkung und Jahresperiodik gesteuert wird, können die hier untersuchten Copepoden anscheinend nicht spontan auf Frost und Trockenheit reagieren, obwohl beide Einflüsse in der Laubstreu auf sie einwirken. Entscheidend sind hier die schon ge-

Abb. 5: Beispiele von Waldparzellen (Tegelbusch, Oldenburg in Niedersachsen), in denen das Falllaub und die Streuschicht nach Boden bewohnenden Copepoden durchsucht wurde. a Rotbuchen-Wald, b Eichen-Wald, c Erlen-Bruchwald.

bildeten Dauerstadien, die als Rückversicherung für die Population stetig gebildet werden und sich im Laub ansammeln. Nielsen (1966) machte ähnliche Versuche, indem er Buchenlaub über einen Zeitraum von 8–9 Tagen austrocknen ließ, in welchem *E. richardi* in großen Mengen vorhanden war. Nach der Wiedervernässung des Laubs dauerte es zwei Tage bis die ersten Nauplien auftauchten, was darauf hindeutet, dass auch in diesem Fall nur die Dauer-eier das Austrocknen überstanden hatten. Immerhin konnte Nielsen (1966) zeigen, dass die Entwicklung von den Nauplien bis zu den Erwachsenen bei hohen Temperaturen (22 °C) 15–18 Tage dauerte, bei niedrigen Temperaturen (10 °C) aber 10–24 Tage.

Ein weiteres Mikrohabitat in Wäldern, in dem *D. bisetosus* auch oft vorkommt, ist Moos wie zum Beispiel *Hypnum jutlandicum*, das im Stammablaufbereich am Fuß von Bäumen wächst (Abb. 5c). Ist das Moos durch anhaltende Niederschläge nass, so leben darin größere Mengen von *D. bisetosus*. Im Winter gesammeltes Moos, das aus bodenfeuchtem Eichenmischwald oder Erlenuwald stammte und durch Frostperioden nur noch mäßig feucht bis trocken war, enthielt nur vereinzelte Exemplare. Spülte man dieses Moos aus und bewahrte das, was sich ausspülen ließ, in einem Kulturgefäß auf, so entwickelte sich nach zwei bis vier Tagen eine Massenkultur von *D. bisetosus*. Anscheinend sind im Moos große Mengen einzystierter Copepodidstadien enthalten. Dafür spricht, dass sie in den Kulturen in großer Zahl noch vor den Nauplien auftreten, die erst einige Zeit später erscheinen.

**Erfassung von Copepoden im norddeutschen Niederungswald**

In der Nähe der Universität Oldenburg (Niedersachsen) wurden Niederungswälder im Hinblick auf die im Waldboden vorkommende Copepodenfauna untersucht. Dabei wurden drei naturnahe Waldparzellen (Tabelle 4) mit unterschiedlichem Baumbestand im Januar und Februar 2004, 2005 und 2006 beprobt. Die Proben umfassten jeweils 100 cm<sup>2</sup> feuchtes bis nasses Laub, das vom Waldboden entfernt und im Labor einfach ausgewaschen und durch eine Siebkaskade gegossen wurde. Zum Schluss wurde das Wasser durch ein Netz mit 40 µm Maschenweite dekantiert, das die Tiere der Bodenmesofauna zurückhält. Als Kulturgefäße dienten einfache Glaschälchen mit 12 cm Durchmesser und 2 cm Wasserstand. Die Tiere wurden in den Kulturen nicht zusätzlich gefüttert, als Nahrung stand ihnen nur der aus dem Laub ausgespülte Detritus zur Verfügung. Die Copepoden ließen sich in den Kulturen im Kühlschrank bei 5 °C über vier bis sechs Monate gut halten.

Lediglich im reinen Rotbuchenbestand fand sich unter der Falllaublage eine zentimeterdicke Streuschicht, in dem Eichenwald (Eichen-Hainbuchen-Mischbestand) und dem Erlbruchwald war bis auf das Herbstlaub praktisch keine Streuschicht vorhanden. An allen Standorten kam über die Jahre nur *B. pygmaeus* stets in großer Individuenzahl als einziger Vertreter der Harpacticoiden vor. An nassen Stellen wurde das Vorkommen von *B. pygmaeus* noch durch das Auftreten von *D. bisetosus* als alleinigem Vertreter der Cyclopoiden ergänzt.

**Tabelle 4: Copepoden der Bodenmesofauna in der Laubschicht dreier Waldparzellen norddeutscher Niederungswälder im Februar 2006.**

Waldparzellen	Rotbuchen (Abb. 5a)		Eichen (Abb. 5b)		Erlbruch (Abb. 5c)	
	Laub	Moos <sup>1</sup>	Laub	(Moos)	Laub	Moos <sup>2</sup>
Copepoden						
<i>B. pygmaeus</i>	80% (z)	–	90% (z)	–	–	–
<i>D. bisetosus</i>	20% (h)	+ (e)	10% (h)	–	70% (h)	+ (z)
<i>P. fimbriatus</i>	–	–	–	–	30% (e)	–
Totale Abundanz	160–560	5–25	250–580		5–52	10–250 <sup>3</sup>
Probenanzahl	6		6		3	

e = einzeln oder spärlich vertreten (1–10 Individuen), h häufig vertreten (10–100 Individuen), z zahlreich vertreten (>100 Individuen); totale Abundanz aller Copepoden (Individuen pro 7,65 g Trockenmasse/100 cm<sup>2</sup>); <sup>1</sup>Moos am Waldboden (Art: *Polytrichum formosum*); <sup>2</sup>Moos am Stammablaufbereich (Art: *Hypnum jutlandicum*); <sup>3</sup>später in Kultur.

Die Studie in den norddeutschen Niederungswäldern legt nahe, dass im Rotbuchen- und Eichenwald während des Winters stellenweise 4.500 Individuen/m<sup>2</sup> von *B. pygmaeus* vorkommen. Die größte lokal festgestellte Dichte lag sogar bei über 10.000 Individuen/m<sup>2</sup>. Diese Dichten reichen zwar nicht an diejenigen heran, die für *M. brevipipes* in der Nadelstreu von Fichtenbeständen des Böhmerwaldes festgestellt wurden, dennoch ist zu vermerken, dass *B. pygmaeus* in den Proben aus Rotbuchen- und Eichenwaldparzellen mit Abstand die am häufigsten nachgewiesene Tierart war. Auffällig ist, dass dort, wo Harpacticoiden in solch eindeutiger Dominanz vorkamen, kaum Nematoden anzutreffen waren. Im Erlenbruchwald, wo lediglich einige Cyclopoiden aber keine Harpacticoiden im Erlenlaub auftraten, kamen Nematoden in den bekannten Dichten mit weit über 9.000.000 Individuen/m<sup>2</sup> vor. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die meisten Harpacticoiden nicht nur Partikelfresser sind, sondern sich durchaus räuberisch ernähren. Nematoden sind anscheinend eine bevorzugte Beute und werden gefressen, wenn sie verfügbar sind (Lehman und Reid, 1992). Auch in den Laborkulturen traten Nematoden nur dann nennenswert auf, wenn Exemplare von *B. pygmaeus* fehlten. Besonders gut entwickelten sich Nematoden deswegen in den Kulturen nach dem Einfrieren, wenn die Harpacticoiden nicht mehr vorhanden waren.

Die Staunässe, die den Waldboden besonders im Winter in einen semi- bis vollständig aquatischen Lebensraum verwandelt, sorgt dafür, dass auch andere aquatische Wirbellose wie Räder- und Bärtierchen ausgesprochen häufig werden. Besonders bdelloide Rädertierchen erreichen zeitweise Dichten, die sicherlich an die Spitzenwerte der Nematoden heranreichen (Tabelle 3). In der dort jahreszeitlich bedingt auftretenden semiaquatischen Lebensgemeinschaft befinden sich außerdem auch etliche Nematoden, Plathelminthen und Oligochaeten (Enchytraeiden), jedoch waren typische und dominante Vertreter der Bodenmesofauna wie Springschwänze oder Milben zwischen den nassen Blättern kaum oder nur vereinzelt anzutreffen.

Es bleibt festzuhalten, dass die Biodiversität der semiaquatischen terrestrischen winterlichen Zersetzergemeinschaft in bodenökologischen Betrachtungen bisher kaum Beachtung findet. Nach Reid (1989) und Christian (2004) trifft

dies insbesondere auf die keineswegs seltenen, Laubstreu bewohnenden Harpacticoiden zu, die anscheinend auch in der Zersetzergemeinschaft eine wichtige, kaum untersuchte Rolle spielen.

### Danksagung

Dieser Beitrag ist aus großer Dankbarkeit meinem Doktorvater Prof. Dr. Horst Kurt Schminke anlässlich seiner Emeritierung gewidmet (Carl von Ossietzky Universität Oldenburg). Er hat meine Arbeiten stets enthusiastisch und mit großem persönlichem Einsatz begleitet. Außerdem hat er mich fortwährend mit der faszinierenden Welt der Krebse bekannt gemacht. Es ist ihm zu wünschen, dass er sich nun mit viel Zeit und Ruhe noch lange den Kleinkrebsen, vor allem den Bathynellen, mit viel Freude und Energie widmen kann.

### Literaturhinweise

- Bethge, P.: Volkszählung im Meer. Der Spiegel 7, 132–147 (2006).
- Bliss, L. C., Courtin, G. W., Patie, D. L., Riewe, R. R., Whitfield, D. W. W., Widdens, P.: Arctic tundra ecosystems. Annual review of ecology and systematics 4, 359–399 (1973).
- Chappuis, P. A.: Die Unterfamilie der Canthocamptinae. Archiv für Hydrobiologie 6, 471–516 (1929).
- Christian, E.: Copepoda from forest floor habitats in Vienna. In: Tajovský, K., Balík, V., Pizl, V. (eds.): 6th Central European Workshop Soil Zoology, Ceske Budejovice; Studies on Soil Fauna in Central Europe, Ceske Budejovice, 2002.
- Christian, E.: Ruderfußkrebse in terrestrischen Böden Österreichs (Crustacea: Copepoda). Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft 70, 11–14 (2004).
- Dahms, H.-U.: Dormancy in the Copepoda – an overview. Hydrobiologia 306, 199–211 (1994).
- Dendy, A.: The cryptic fauna of Australia. Australian and New Zealand Association for Advancements in Science, 6th meeting, Brisbane, 99–119 (1895).
- Drewes, J.: Morphologie, Systematik und Verbreitung von Vertretern der Taxa *Metahuntemannia* und *Talpina* (Harpacticoida, Copepoda, Crustacea). Diplomarbeit, Carl von Ossietzky Universität, Oldenburg, 2005.
- Ehrnsberger, R.: Bodenzoologie und Agrarökosysteme. In: Ehrnsberger, R. (Hrsg.): Bodenmesofauna und Naturschutz. Informationen zu Naturschutz und Landschaftspflege in Nordwestdeutschland, Bd. 6, Naturschutzverband Niedersachsen e.V. und Universität Vechta, Verlag Günter Runge, Cloppenburg 1993.
- Einsle, U.: Crustacea. Copepoda, Calanoida und Cyclopoida. In: Schwoerbel, J., Zwick, P. (Hrsg.): Süßwasserfauna von Mitteleuropa. Bd. 8/ 4-1. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart 1993.
- Elgmork, K.: Evolutionary aspects of diapause in freshwater copepods. In: Kerfoot, C. (ed.): Evolu-

- tion and ecology of zooplankton communities. The University Press of New England, Hannover 1980.
- Erwin, T. L.: Tropical forests: their richness in Coleoptera and other arthropod species. The Coleopterists' Bulletin 36, 74–75 (1982).
- Fiers, F., Ghene, V.: Cryptozoic copepods from Belgium: diversity and biogeographic implications. Belgian Journal of Zoology 130, 11–19 (2000).
- Gad, G.: Grundwasserfauna. In: Peters, J., Pott, R., Janiesch, P., Wolff, J. (Hrsg.): Umweltverträgliche Grundwasserbewirtschaftung in hydrogeologisch und ökologisch sensiblen Bereichen der Nordseeküste. Husum Druck- und Verlagsgesellschaft, Husum 2003.
- Gleich, M., Maxeiner, D., Miersch, M., Nicolay, F.: Life Counts – eine globale Bilanz des Lebens. Berlin Verlag, Berlin 2000.
- Grimaldi, D., Engel, M. S.: Evolution of the insects. Cambridge University Press, Cambridge 2005.
- Gruner, H.-E., Moritz, M., Dunger, W.: Arthropoda (ohne Insecta). In: Gruner, H.-E. (Hrsg.): Lehrbuch der Speziellen Zoologie, Bd. 1, 4. Teil. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart 1993.
- Gurney, R.: British fresh-water Copepoda II. Ray Society, London 1932.
- Hake, J.: Die Paranannopidae Por, 1986 (Harpacticoida, Copepoda) in den Gewässern um King George Island (Antarktis). Diplomarbeit, Carl von Ossietzky Universität, Oldenburg 2002.
- Háněl, L., Christian, E.: *Moraria brevipes* (Crustacea: Copepoda) in South Bohemian forest soils. Acta Societatis Zoologicae Bohemoslovaca 68, 169–171 (2004).
- Harding, J. P.: *Bryocamptus stouti* and *Gonicocyclops silvestris*, two new species of copepod crustacean from forest litter in New Zealand. The Annals and Magazine of Natural History, zoology, botany and geology, 13. series 1, 309–314 (1958).
- Janetzky, W., Enderle, R., Noodt, W.: Gelyelloida und Harpacticoida. In: Schwoerbel, J., Zwick, P. (Hrsg.): Süßwasserfauna von Mitteleuropa. Bd. 8. Crustacea, Heft 4. Copepoda, Teil 2. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart 1996.
- Klie, W.: Harpacticoiden aus Falllaub. Zoologischer Anzeiger 142, 183–191 (1943).
- Kikuchi, Y.: Morphological comparison of two terrestrial species of *Moraria* (Canthocamptidae, Harpacticoida) from Japan, with the scanning electron microscope. Crustaceana, supplement 7, 279–285 (1984).
- Lehman, P. S., Reid, J. W.: *Phyllognathopus viguieri* (Crustacea: Harpacticoida), a predaceous copepod of phytoparasitic, entomopathogenic, and free-living nematodes. Soil and Crop Science Society of Florida (Proceedings) 52, 78–82 (1992).
- May, M.: Wie viele Arten von Lebewesen gibt es? In: König, B., Linsenmair, K. E. (Hrsg.): Biologische Vielfalt. Verständliche Forschung, Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg 1996.
- Nielsen, L. B.: Studies on the biology of Harpacticoida (Copepoda, Crustacea) in Danish beech leaf litter. Natura Juratica 12, 195–211 (1966).
- Noll, W., Stammer, H. J.: Die Grundwasserfauna des Untermaingebietes von Hanau bis Würzburg mit Einschluss des Spessarts. Mitteilungen des naturwissenschaftlichen Museums der Stadt Aschaffenburg 6, 1–77 (1953).
- Reid, J. W.: Semiterrestrial meiofauna inhabiting a wet campo in central Brazil, with special references to the Copepoda (Crustacea). Hydrobiologia 118, 95–111 (1984).
- Reid, J. W.: Some usually overlooked cryptic copepod habitats. Proceedings of 2nd International Conference on Copepoda, Stylogeus, Ottawa 58, 594–598 (1989).
- Remy, P. A.: Sur la faune d' éricole des forêts. Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences, Paris 194, 127–129 (1932).
- Røen, U.: Contributions to the biology of some Danish free-living freshwater copepods. Biologiske skrifter 9, 1–101 (1957).
- Schaeffer, M.: The animal community: diversity and resources. In: Röhrig, E., Ulrich, B. (eds.): Ecosystems of the world, Vol. 7: Temperate deciduous forests. Elsevier, München 1991.
- Schminke, H. K.: Mandibulata, Crustacea. In: Westheide, W., Rieger, R. (Hrsg.): Spezielle Zoologie. Erster Teil: Einzeller und Wirbellose Tiere. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart 1996.
- Schminke, H. K.: Harpacticoida (Ruderfußkrebse). In: Schminke, H. K., Gad, G. (Hrsg.); DWA (Hrsg.): Grundwasserfauna Deutschlands – ein Bestimmungswerk, DWA-Themen Mai 2006, Hennef 2006.
- Schminke, H. K.: Entomology for the copepodologist. Journal of Plankton Research (im Druck).
- Scourfield, D. J.: Entomostraca in strange places. Journal of the Quekett Microscopical Club 4, 1, 116–122 (1939).
- Stork, N. E.: Insect diversity: facts, fiction and speculation. Biological Journal of the Linnean Society, London 35, 321–337 (1988).
- Stout, J. D.: Some observations on the protozoa of some beechwood soils on the Chiltern Hills. Journal of Animal Ecology 32, 281–287 (1963).
- Strum, H.: Zur Ökologie der andinen Paramoregion. Biographica 14, 1–121 (1978).

Verfasser: Dr. Gunnar Gad, Fakultät V (Mathematik und Naturwissenschaften), Institut für Biologie & Umweltwissenschaften, AG Zoosystematik und Morphologie, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 26111 Oldenburg, E-Mail: gunnar.gad@uni-oldenburg.de

## Nachricht

# Unterschreitung des Abbe'schen Auflösungslimits um den Faktor 10 – Zukunftspreis für Stefan Hells STED-Mikroskopie

Prof. Dr. Stefan Hell, Direktor des Max-Planck-Instituts für Biophysikalische Chemie in Göttingen, nahm am 23. November 2006 den renommierten Deutschen Zukunftspreis aus den Händen von Bundespräsident Horst Köhler entgegen. Dieser Preis, der 2006 zum zehnten Mal verliehen wurde, ist mit 250.000 Euro dotiert. Der Bundespräsident zeichnet damit alljährlich innovative Projekte aus, die wissenschaftlich bahnbrechend und zugleich anwendungs- und marktreif sind.

Professor Hell erhielt den Zukunftspreis für die von ihm erfundene STED-Mikroskopie. STED steht für „stimulated emission depletion“, also „stimulierte Emissionslöschung“. Mit Hilfe dieser Methode kann die Abbe'sche Auflösungsgrenze zumindest in der Fluoreszenzmikroskopie überwunden werden. Ein STED-Mikroskop erreicht eine Auflösung von 50 bis 70 Nanometer. Damit reduziert sich die Fläche des Fluoreszenzspots von ursprünglich 200 Nanometer Durchmesser um etwa eine Größenordnung. Das patentierte STED-Verfahren wurde für Leica Microsystems lizenziert. Leica entwickelt die STED-Mikroskopie zum anwenderfreundlichen Gerät und wird es 2007 auf den Markt bringen. Produziert wird das neue System in Wetzlar und Mannheim.

Bereits Anfang des Jahres war das Gespräch Stefan Hell / Leica Microsystems erfolgreich, als Leica Mi-

crosystems für das Leica TCS 4PI den Innovationspreis der Deutschen Wirtschaft 2005 erhielt. Auch dieses höchstauflösende Mikroskopsystem hatte Hell erfunden und wurde von Leica vermarktet. Hell hat als Erster einen Weg gefunden, die 130 Jahre alte Abbe'sche Auflösungsgrenze im Fluoreszenzmikroskop, dem derzeit wichtigsten Mikroskop der biomedizinischen Forschung, zu überwinden.

Seit dem 17. Jahrhundert steht das Lichtmikroskop wie kaum ein anderes Instrument für wissenschaftlichen Fortschritt – insbesondere in der Biologie und der Medizin. Mit Hilfe der STED-Mikroskopie können heute Moleküle viel schärfer als bisher dargestellt werden. Das Neue an diesem Verfahren ist, dass die Schärfe der mikroskopischen Bilder nicht mehr wie durch Abbe postuliert durch die Lichtwellenlänge begrenzt ist. Die erreichbare Auflösung ist nur eine Frage der Umsetzung. So erreichten Hell und seine Mitarbeiter bereits Auflösungen von 20 Nanometern, also 10fach über Abbes Grenze. Da Proteinkomplexe im Bereich 10–200 Nanometer liegen, hat dieses Mikroskopierv erfahren das Potenzial, alsbald in die molekulare Skala des Lebens vorzudringen und unter anderem Krankheiten besser auf die Spur zu kommen. Die optische Erschließung der Nanoskala verspricht einen bisher kaum für möglich gehaltenen Zugang zum Verständnis der Lebensvorgänge in der Zelle.

## Neue Medien

**Webster, J. (Hrsg.): Mykologie, Vol. 1. Niedere Pilze und pilzähnliche Organismen.**

2. Auflage 2006, Stumm-Film und IWF Wissen und Medien GmbH, interaktive DVD-ROM, Farbe, Ton, € 115,00, IWF-Bestell-Nr. C 12992, ISBN-10 3-88222-083-X, ISBN-13 978-3-88222-083-4.

Die Aufnahmen zu dieser DVD wurden zwar bereits in den Jahren 1961 bis 1990 angefertigt, haben jedoch nichts an Aktualität eingebüßt. In dieser 2. Auflage der Mykologie, Teil 1, werden die Niede-

ren Pilze und pilzähnliche Organismen nach aktualisierten Gesichtspunkten der Systematik neu geordnet und bedienerfreundlich auf einer DVD präsentiert. Die 1. Auflage von 1990 war als Videodisc/Bildplatte erhältlich, eine Technik, die heute kaum noch Verwendung findet. Daher kann man sich freuen, diese schönen Aufnahmen und ihre Erläuterungen nun so komfortabel zur Verfügung zu haben. In etwa 160 Kapiteln werden die Organisation, Entwicklung und Fortpflanzung von Myxomycota, Plasmodiophoromycota, Labyrinthulomycota, Oomycota, Chytridiomycota und

Zygomycota über Schemata und insbesondere Videoclips vorgestellt. Bei den Zygomycota werden beispielsweise auch Insekten pathogene Organismen vorgestellt, die ihr Opfer regelrecht durchwuchern. Insgesamt stehen 72 min Film zur Verfügung; der gesprochene Text ist mit abgedruckt. Der Kommentar ist auf Deutsch oder Englisch erhältlich. Für den Einsatz in der Lehre ist dieses Medium hervorragend geeignet, aber natürlich macht es auch so Spaß, sich in die Welt der „Pilze“ versetzen zu lassen und etwas darüber kennen zu lernen.

Renate Radek, Berlin

# Dias mit der digitalen Kamera abfotografieren – Selbstbau einer „digitalen Lichtbox“

Hans Jürgen Steinkohl

Die digitale Fototechnik hat uns alle erfasst, digitale Kameras sind inzwischen nahezu in jedem Haushalt in Gebrauch. Doch was macht man mit seinen analogen Dias, mit den interessanten Reiserinnerungen oder, wie in meinem Fall, mit einer Menge von Mikroskopaufnahmen, welche im Laufe von 15 Jahren entstanden sind und eine wissenschaftliche Fundgrube darstellen können? Einfacherweise kann man sich einen Diascanner anschaffen, Preislage zwischen 600 und 1000 € je nach Qualitätsanspruch. Die Scanzzeit liegt bei den verschiedenen Geräten und abhängig von der verwendeten Auflösung im günstigsten Fall bei 20 Sekunden, meistens jedoch bei mehr als 50 Sekunden.

**M**an kann sich aber auch mit billigsten Mitteln eine Vorrichtung bauen, welche Dias in Sekundenschnelle digitalisiert, vom Kleinbild bis zum Format 6 × 7 cm, in hervorragender Qualität und perfekter Schärfe (siehe Titelbild).

## Voraussetzungen an die Geräte (Grundausstattung)

Wer sich intensiv mit Fotografie beschäftigt, bei dem sind folgende Geräte eventuell bereits vorhanden:

- Digitale Kamera, besonders geeignet ein Spiegelreflex-System
- Makroobjektiv bis 1:1 oder Zwischenringe beziehungsweise Balgengerät
- Blitzgerät, bevorzugt mit Steuerung durch die Kamera
- Leuchtpult (Diasortierpult), auch im Selbstbau gut möglich.

Die selbst gestellten Anforderungen an die Konstruktion waren:

- Schnelligkeit beim Digitalisieren der Dias
- Super Qualität als Ergebnis
- Für mehrere Diaformate von Kleinbild bis 6 × 7 cm geeignet
- Stabile Konstruktion
- Geringer Nachbearbeitungsaufwand des digitalen Bildes
- Geringe Herstellungskosten unter Verwendung der vorhandenen Fotoausrüstung.

## Funktionsweise der danach entstandenen Konstruktion

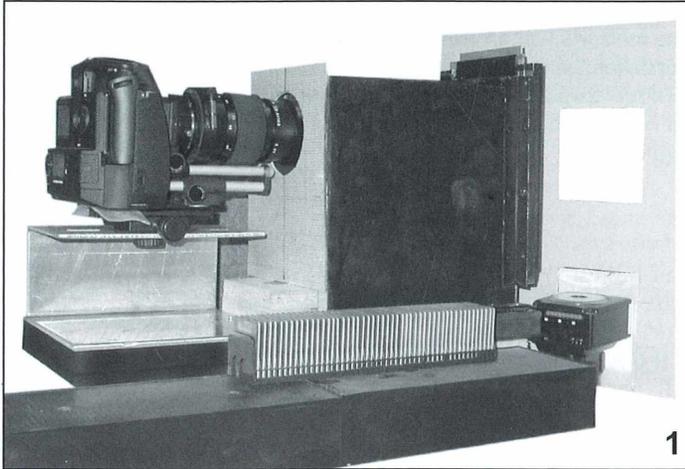
Vorausschicken muss ich, dass zunächst unternommene Versuche mit einem vorhandenen Farbmischkopf oder dem direkten Anblitzen der Dias keine zufrieden stellenden Ergebnisse gebracht haben. So hat sich nach diesen Fehlschlägen ergeben, dass die Lichtqualität zum Abfotografieren von Dias der wichtigste Bestandteil meiner Konstruktion sein musste, um die Dias möglichst farbecht zu digitalisieren. Dieses Licht mit immer konstanter Farbtemperatur erhält man nur mit einer Blitzröhre, und damit es nicht zu kontrastreich wird, muss es mehrfach reflektiert werden, damit es möglichst weich wird. Alte Hasen der Dunkelkammertechnik wissen noch, dass die Farbmischköpfe der Farbvergrößerer patentierte Systeme hatten, um ein besonders weiches Licht zu erhalten. Der von der Kamera gesteuerte Blitz schickt sein Licht in das senkrecht angeordnete Leuchtpult, wo es als weiches, gefiltertes Licht reflektiert wieder zurückkommt und somit die ideale Belichtung für unser Dia darstellt (Abb. 1). Gleichzeitig wird das eingeschaltete Leuchtpult als perfektes Einstelllicht zur Kontrolle des Dias verwendet. Dies ist ein weiterer großer Vorteil dieser Lichtbox-Lösung. Damit das Licht vom Blitz in dieser Lichtbox besonders „durchgemischt“ wird, habe ich die gesamte Glasfront des Leuchtpultes mit einem Karton abgedeckt, der innen zusätzlich mit einer Alufolie überzogen wurde. Lediglich die beiden Lichtein- und -austrittsöffnungen wurden ausgespart. Der Blitz ist direkt an die Glasscheibe angesetzt.

### Konstruktion der Blackbox

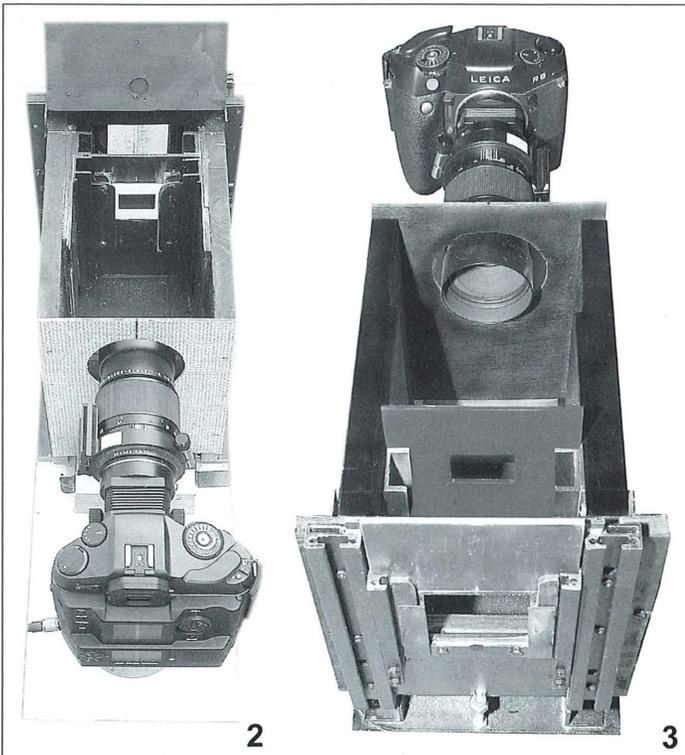
Das Zentrum der oberen Lichtaustrittsöffnung der Blackbox stellt für die nachfolgende Konstruktion die optische Achse dar, das heißt, die Filmbühnen sind mit ihrem Zentrum ebenfalls in dieser Achse anzubringen. Natürlich muss auch die Kamera diese gedachte optische Achse aufnehmen. Genau senkrecht zu dieser opti-

schen Achse müssen die Filmbühnen angeordnet werden. Dies ist sehr wichtig, damit das Dia zur Kamera als ebene Fläche vorliegt. Je mehr Zeitaufwand und Überlegungen in die Konstruktion und Genauigkeit der Filmbühnen verwendet werden, umso schneller und genauer ist später der Ablauf beim Abfotografieren.

Bei exakter Ausführung und Ausrichtung der Bühnen liegt das Dia nach jedem Wechsel im-



**Abb. 1:** Geräteaufbau zum digitalen Abfotografieren von Dias. Die Kamera ist über eine Schnellwechselplatte auf einen Aluminium-U-Winkel montiert (Schlitz zum Verschieben der Kamera). Kamera mit 100 mm Makroobjektiv und Balgengerät. Blackbox mit Schiebern zur Aufnahme der Dias. Leuchtpult-Frontseite mit zwei Ausschnitten in der Kartonabdeckung; unten angesetzter Elektronenblitz, oben Lichtaustrittsöffnung zur Diabelichtung.



**Abb. 2 und 3:** Beschreibung der Blackbox. Die Vorderseite nimmt den justierbaren Schieber des 6 x 6 cm Dias auf. Dia wird in Führungsprofile eingeschoben. Die Kleinbild-Diabühne im Innern der Box ist entsprechend konstruiert. Zur Vermeidung von Reflektionen ist die Box innen mattschwarz gesprüht. Ein klappbarer Deckel schließt Fremdlicht aus (Klavierband). Abmessungen der Box: Länge 28 cm, Breite 20 cm, Höhe 28 cm (abgestimmt auf Leuchtpultgröße). Abmessungen des selbst gebauten Leuchtpults: Länge 53 cm, Breite 43 cm.

mer in der gleichen Ebene, sodass nach jedem Diawechsel nahezu keine Korrekturen der Schärfe vorgenommen werden müssen. So ist es ohne Stress möglich, mindestens vier Dias pro Minute einzuscannen. Die erzielbare Qualität des digitalen Bildes ist von der Leistungsfähigkeit des verwendeten Objektivs und des Kamerachips sowie dem gewählten Aufnahmeformat (RAW, TIFF, JPEG, usw.) abhängig. Nachfolgende Auflösungen können im Vergleich zu Diascannern herangezogen werden (Auszug aus der Zeitschrift *Naturfoto* 1/2006):

Kamera mit 6 Megapixel: etwa 2.100 ppi  
 Kamera mit 8 Megapixel: etwa 2.500 ppi  
 Kamera mit 10 Megapixel: etwa 2.700 ppi

Daraus folgt, dass bereits eine 6-Megapixel-Kamera eine Qualität liefert, die Ausdrucke in der Größe von 20/30 cm in hoher Qualität ermöglicht. Empfehlungen zur Kameraeinstellung: Nicht Auto Weißabgleich, sondern Sonnensymbol oder Blitzlicht verwenden. Zur Befestigung der Kamera über eine Schnellwechselplatte hat sich ein kräftiger Aluminium-

winkel bewährt, der die Kamera genau in der Höhe der optischen Achse der Filmbühnen aufnimmt. Damit dies aber nachträglich noch genauer korrigiert werden kann, ist es sinnvoll, die Filmbühnen in der Senkrechten justierbar zu machen (Abb. 3).

### Weiterbearbeiten der digitalisierten Dias

Die digitale Bildbearbeitung ermöglicht es uns, zum Beispiel in einer Mikroaufnahme störende Verunreinigungen des Präparates nachträglich zu beseitigen, Objekte freizustellen, Ausschnitte hervorzuheben und somit das Wesentliche der ursprünglichen Aufnahmeabsicht deutlicher zu machen. Es macht unendlich Spaß, sich auf diese Weise mit seinen „alten“ Mikroaufnahmen nachträglich zu beschäftigen und dabei Neues zu entdecken.

Verfasser: Hans Jürgen Steinkohl, Max-Matheis-Straße 64, 94036 Passau, E-Mail: [summilux@gmx.de](mailto:summilux@gmx.de)

## Kurze Mitteilung

### Samenwand und Aromabildung der Kakao-Bohne

Die Samen des tropischen Kakao-Baumes (*Theobroma cacao*) sind das Ausgangsmaterial für Schokolade, aber als solche nicht direkt für die Verarbeitung geeignet. Die Samen (ca. 50 pro Frucht) werden dem Fruchtfleisch der circa 20 cm langen Früchte entnommen und rund 10 Tage lang einem Prozess der Fermentation unterworfen, wobei die typische braune Farbe und das charakteristische Aroma entstehen. Bei der Fermentation beginnen die Samen kurz anzukeimen und erwärmen sich im Fruchtfleisch auf etwa 50 °C. Dabei verflüssigt sich das Fruchtfleisch und löst sich von den Bohnen. Mikroorganismen, welche die Fermentation unterstützen, werden durch Fliegen auf dem Fruchtfleisch hinterlassen. Fruchtfleisch und Samenschale sind rein mütterlichen Ursprungs, während Embryo und Endosperm genetisch von beiden Eltern bestimmt werden. Das Aroma der Kakao-Bohnen wird stark durch Transporterscheinungen in der Samenschale bestimmt, die auch für die Umsetzung der Essigsäure, das

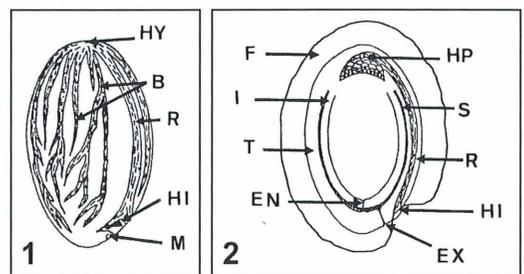


Abb. 1: Habitus des jungen Kakao-Samens; Breite 10 mm. B Gefäßbündel, HI Hilum (Nabel), HY Hypostase, M Mikropyle (Empfängnisstelle an der bei der Keimung zunächst das Würzelchen austritt), R Raphe (Samennaht). – Abb. 2: Schematischer Längsschnitt durch die Samenanlage von *Theobroma cacao*. EN Endostomium (innere Mikropyle), EX Exostomium (äußere Mikropyle), F Fruchtknotenwand, HI Hilum, HP Hypostase, I Integumente, T Testa (Samenschale), R Raphe, S Sklerid-Schicht außerhalb der Integumente.

Hauptprodukt des Fermentationsprozesses, verantwortlich ist. Über die Verschiebungen innerhalb der Samenschale ist wenig bekannt; dies ist umso erstaunlicher, als die Fermentationsprozesse für die Qualität der Kakao-Produkte von entscheidender Bedeutung sind.

Die Transportprozesse in der Samenschale wurden mikroskopisch untersucht. Dazu wurden die jungen Samen in 4%iger wässriger Formaldehydlösung fixiert. Teile des Samens (Abb. 1), wie Mikropyle, Nabel, Raphe und Chalaza werden getrennt in Alkoholserien dehydriert und in LR-White Medium Grade Harz (London Resin Company) eingebettet und zu Dünnschnitten von 1–5 µm Dicke verarbeitet. Für die lichtmikroskopische Beobachtung wurden die Schnitte in Toluidin-Blau (0,05% in destilliertem Wasser) oder mit Methylen-Blau/basischem Fuchsin (1%ig in 1% Natriumboratlösung) angefärbt.

Während der Fermentation wird ein Teil der Zucker des Fruchtfleisches und der Bohnen zu Alkohol vergärt und anschließend zu Essigsäure oxidiert. Diese Essigsäure zersetzt den Fruchtfleischbrei und setzt dabei die Aromastoffe (Theobromin bis zu 2%; Coffein nicht mehr als 0,5%; Salsolinol; Phenylaethylamin) in den Bohnen/Samen frei. Durch anschließendes Trocknen wird die flüchtige Essigsäure weitgehend entfernt.

Die Ergebnisse der Untersuchung, auch unter Mitwirkung von radioaktiven Isotopen, waren folgende: Die Strukturen der Samenschale beeinflussen entscheidend die Transportprozesse in den Samen (Abb. 2), insbesondere die innere Kontaktzone vom Fruchtfleisch, das Hilum, die Skleriden, die Hypostase, die Mikropyle und die Kutikula des Endosperms. Unter natürlichen Bedingungen verhindern diese Strukturen das Austrocknen und Auslecken der Nährstoffe aus den ungekeimten Samen. Nach dem Fermentationsprozess jedoch fördern die genannten Strukturen das Einströmen der Essigsäure in Analogie zum Wasser. Wird durch diese Strukturen aber die Versauerung zu stark oder unzureichend, dann hat das einen verminderten Einstrom von Vorstufen der Aromastoffe zur Folge; dies wiederum führt zu einer Verminderung oder Verstärkung des Aromas. Asynchroner oder/und ungleichmäßiger Einstrom der Essigsäure aus dem Fruchtfleisch in das Gewebe der Kotyledonen resultiert in inkonsistenter und suboptimaler Aromabildung. Das bedeutet, dass die Qualität des Kakao-

Aromas in den fermentierten Samen/Bohnen wesentlich beeinflusst wird durch die Transportkinetik der Flüssigkeiten während des Fermentationsprozesses – und nicht, wie bisher angenommen wurde, durch genetisch determinierte Unterschiede der Reserveproteine in den Keimblättern der Samen. Es sind also die Transportbarrieren im Samen für die bei der Fermentation entstehende Essigsäure, welche das Aroma bestimmen. Die Kutikula des Endosperms fungiert als apoplastische Barriere für die Essigsäure, bis ein bestimmter pH-Wert erreicht ist. Die Hypostase stellt die Barriere dar, welche das Eindringen der Essigsäure in die Chalaza-Region verhindert. Eine gut entwickelte Hypostase-Struktur ist also eine entscheidende Voraussetzung für eine gute Aromaproduktion der betreffenden Kakao-Varietät.

#### Literaturhinweis

Andersson, M., Koch, G., Lieberei, R.: Structure and function of the seed coat of *Theobroma cacao* L. and its possible impact on flavour precursor development during fermentation. *Journal of Applied Botany and Food Quality* 80, 48–62 (2006).

H. F. Linskens, Nijmegen

 **euromex**  
MICROSCOPES HOLLAND

**Mikroskope**  
**Stereomikroskope**  
**Mikrotome**  
**Kaltlichtbeleuchtung**  
**Refraktometer**

- neueste Technologien
- hochwertige Optik
- präzise Metallverarbeitung
- sorgfältige Montage
- relativ niedrige Preise



STEREOMIKROSKOP E-REIHE



MIKROSKOP F-REIHE

Fordern Sie unseren Prospekt an

**euromex microscopon b.v.**  
Papenkamp 20, 6836 BD Arnhem, Niederlande  
Tel.: +31.26.323.4473, Fax +31.26.323.2833  
email: [euromex@tref.nl](mailto:euromex@tref.nl), web: <http://www.euromex.nl>

# Zellen und Strukturen mit berühmten Namen

## Teil 3: Langerhans-Inseln

Bernd Walz

Langerhans-Inseln sind die körpereigenen Insulinfabriken in der Bauchspeicheldrüse (Pankreas). Das Hormon Insulin ist für den Energiestoffwechsel des Körpers von zentraler Bedeutung, denn es wird in die Blutbahn abgegeben, wenn nach einer Mahlzeit der Blutzuckerspiegel ansteigt. Da Insulin die Glukose-Aufnahme in Leber-, Muskel- und Fettzellen stimuliert, dient dieses Hormon der Regulation des Blutzuckerspiegels. Die Zuckerkrankheit (Diabetes mellitus) ist durch erhöhten Blutzuckerspiegel gekennzeichnet. Glukagon wirkt als Gegenspieler des Insulins. Dieses ebenfalls in den Langerhans-Inseln gebildete Hormon erhöht den Blutzuckerspiegel, weil es den Abbau des Speicher-Kohlenhydrats Glykogen in den Leberzellen fördert. Die Langerhans-Inseln hat der in Berlin geborene Paul Langerhans als junger Doktorand entdeckt (Abb. 1).

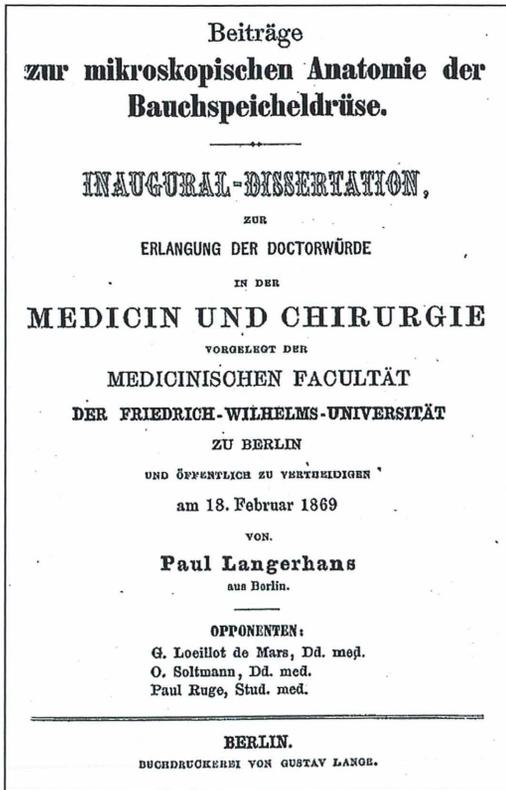
**P**aul Langerhans beschrieb in seiner Dissertation (Abb. 2) einen Zelltyp im Pankreas des Kaninchens, der sich in seinem Färbeverhalten deutlich von anderen Zelltypen unterschied. Er schrieb: *Diese Zellen liegen meist in grösserer Zahl bei einander, eigenthümlich vertheilt im Parenchym der Drüse. ... Diese (Zellen) sind also, zu rundlichen Häuflein geschaart, in regelmässigen Abständen im Parenchym der Drüse verteilt. Ihre Häuflein zeigen meist einen Durchmesser von 0,1 bis 0,24 Millimeter, und sind ohne Mühe auch an Zerkupfungspräparaten, ..., wahrzunehmen.* Langerhans fand keinerlei Anhaltspunkte, die ihm bei einer Erklärung der Funktion dieser Zellen geholfen hätten. Deshalb schrieb er etwas hilflos: *War nun die Antwort, die ich oben auf die Frage nach der Natur der centro-acinären Zellen (in den exokrinen Anteilen des Pankreasgewebes, s.u.) zu geben vermochte, eine nur ungenügende und bedingte, so gilt dies leider in noch höherem Masse von der Art, wie ich die analoge Frage bei diesen Zellen zu beantworten im Stande bin. Denn oben konnte ich wenigstens mit einem gewissen Grade von Wahrscheinlichkeit eine bestimmte Ansicht formulieren; hier aber gestehe ich offen, dass mir jegliche Möglichkeit einer Erklärung fehlt.*

Erst fünf Jahre nach Paul Langerhans Tod nannte der französische Physiologe G. E. Langueuse (1816–1888) die von Langerhans be-

schriebenen Zellhäuflein *ilots de Langerhans* und vermutete, diese Strukturen könnten mit der inneren Sekretion der Bauchspeicheldrüse und der Zuckerkrankheit in Zusammenhang stehen. Diese Vermutung konnte 1889 durch die zwei Straßburger Physiologen, Joseph von Mering und Oskar Minowski bestätigt werden. Diese beiden Wissenschaftler hatten Hunden die Bauchspeicheldrüsen entfernt. 10 Tage nach der Operation verstarben die Hunde. Sie hatten an Körpergewicht verloren, tranken ständig und schieden Zucker mit dem Harn aus. Der Durchbruch bei der Entdeckung des Insulins



Abb. 1: Paul Langerhans: 1847–1888.



**Abb. 2:** Titelblatt der Dissertation von Paul Langerhans (aus: <http://www.uniklinikum-giessen.de/med3/history/langerh/langerh.htm>, verändert).

erfolgte erst in den zwanziger Jahren des letzten Jahrhunderts und ist mit den Namen von vier kanadischen Wissenschaftlern verknüpft. Es sind F. Banting (Nobelpreis für Medizin, 1923), C. Best, J. B. Collip und J. J. R. MacLeod, die am Physiologischen Institut der Universität Toronto arbeiteten. Sie fanden heraus, dass sich mit einem Pankreasextrakt der Blutzuckerspiegel diabetischer Hunde reduzieren ließ. Der Biochemiker J. B. Collip isolierte aus dem Pankreasextrakt dann 1922 das Insulin, das erfolgreich an zuckerkranken Patienten getestet werden konnte. Im gleichen Jahr begann das Pharma-Unternehmen Eli Lilly in Indianapolis mit der Insulinproduktion aus Schweine- und Rinderbauchspeicheldrüsen. Seit Ende der siebziger Jahre wird Insulin gentechnisch hergestellt.

## Kurzbiographie

Paul Langerhans wurde nur knapp 41 Jahre alt. Am 25. Juli 1847 in Berlin als Sohn eines Arztes geboren, studierte er an den Universitäten Jena und Berlin Medizin. In Berlin promovierte er 1869 mit einer Arbeit *Beiträge zur mikroskopischen Anatomie der Bauchspeicheldrüse*, aus der oben bereits zitiert wurde. Nach seiner Habilitation (1871) im Fachgebiet Pathologische Anatomie wurde Paul Langerhans 1874 außerordentlicher Professor. Diese Professur musste er aufgrund einer Lungentuberkulose bald aufgeben, und er siedelte in der Hoffnung auf Genesung 1875 auf die Insel Madeira um, wo er in der Hauptstadt Funchal als praktischer Arzt tätig war. Am 20. Juli 1888 verstarb Paul Langerhans nur wenige Tage vor seinem 41. Geburtstag an einer Niereninfektion.

Die wissenschaftlichen Aktivitäten Langerhans waren vielfältig. Bereits ein Jahr vor seiner Promotion veröffentlicht Langerhans eine Arbeit *Über die Nerven der menschlichen Haut*. In dieser Arbeit beschreibt er unter anderem verzweigte, nicht pigmentierte Zellen, die heute als Langerhans-Zellen bekannt sind. Erst 1973 entdeckte I. Siberberg, dass die Langerhans-Zellen als „Außenposten des Immunsystems“ gelten können, weil sie einer Zelllinie des Knochenmarks entstammen und mit den Makrophagen verwandt sind. Weitere wissenschaftliche Arbeiten beschäftigten sich mit den Augen des Neunauges und dem Bau des Herzens von Amphibien. Paul Langerhans studierte die Fauna Madeiras und der Kanarischen Inseln, und er veröffentlichte zwei Arbeiten über sein eigenes Leiden, die Tuberkulose.

## Lage, Bau und Zelltypen der Langerhans-Inseln

Die Langerhans-Inseln liegen verstreut in der Bauchspeicheldrüse (Pankreas) (Abb. 3A). Das Pankreas ist eigentlich eine so genannte exokrine Drüse, die circa 20 verschiedene Verdauungsenzyme im alkalischen (pH > 8) Pankreassaft über ein Gangsystem und den Hauptausführungsgang in den Zwölffingerdarm (Duodenum) sezerniert (Abb. 3A). Das exokrine Pankreasgewebe besteht aus Drüsenläppchen. Schnittpräparate durch derartige Drüsenläppchen zeigen Anschnitte zahlloser teils tubulärer Azini (Abb. 3C). Dieses sind die sekretorisch

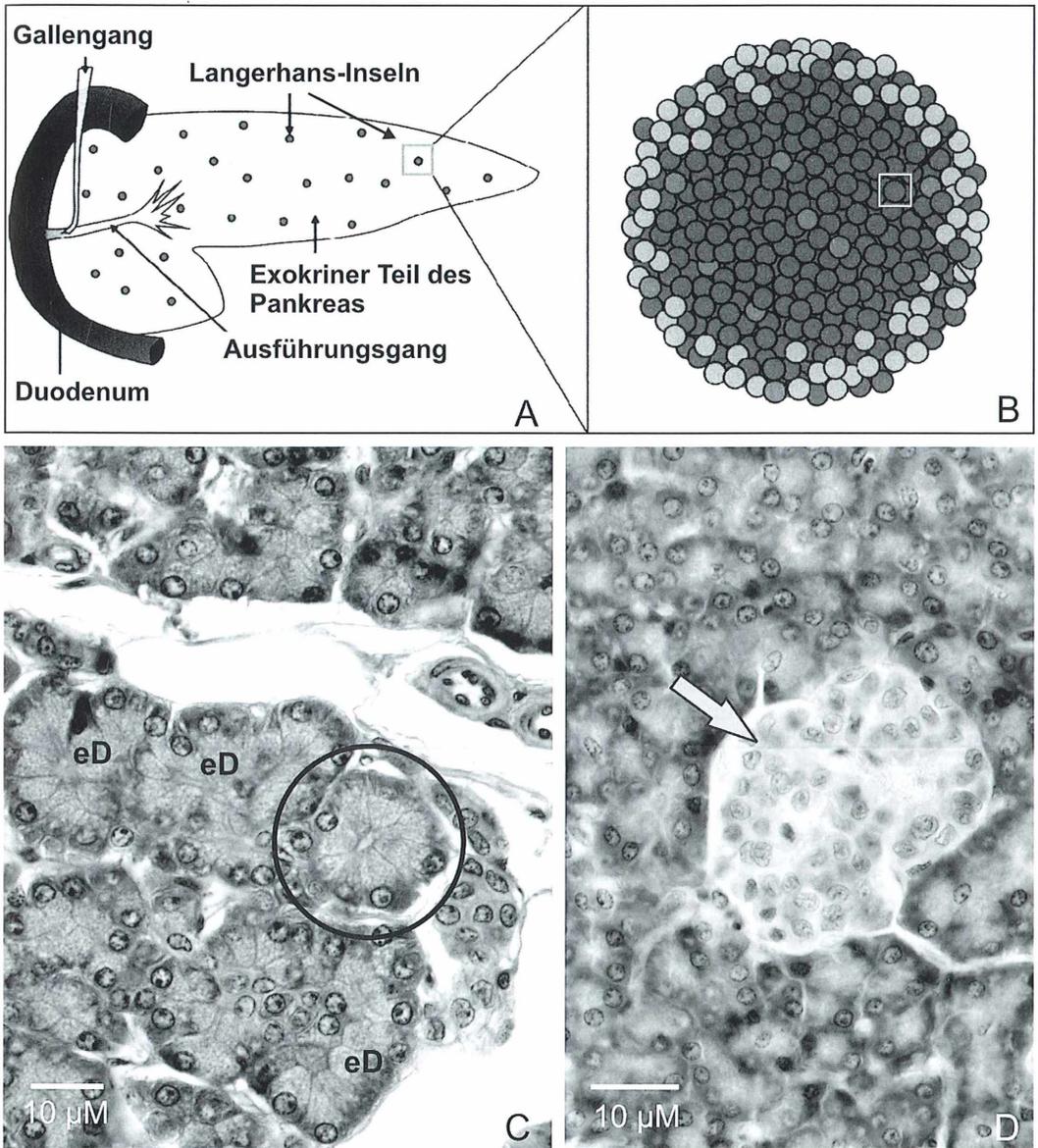


Abb. 3: A Die Bauchspeicheldrüse besteht überwiegend aus exokrinem Drüsengewebe, das über den Pankreas-Ausführungsgang Verdauungsenzyme und Bicarbonat-Ionen in den Zwölffingerdarm (Duodenum) sezerniert. Die Langerhans-Inseln enthalten endokrine Zellen, die Hormone in die Blutbahn abgeben. B Schematische Darstellung einer Langerhans-Insel. Die Mehrzahl die Inselzellen sind Insulin-produzierende  $\beta$ -Zellen (dunkle Zellen) im Inneren der Inseln. Die weniger zahlreichen Glucagon-sezernierenden  $\alpha$ -Zellen liegen mehr peripher (helle Zellen). Die noch selteneren Somatostatin-sezernierenden  $\delta$ -Zellen sind mittelgrau eingefärbt und liegen verstreut in den Inseln verteilt (A und B nach MacDonald und Rorsman, 2006). C Schnitt durch den peripheren Teil eines Drüsenläppchens des exokrinen Pankreasgewebes mit sekretorischen Azini (eD). Ein Azinus (Kreis) ist quer getroffen. Die Azinuszellen sind konzentrisch um ein zentrales Lumen herum angeordnet. Ihre Zellkerne sind peripher lokalisiert. Dem Lumen des Azinus zugewandte Zellbereiche sind heller gefärbt und enthalten sekretorisches Material. D Schnitt durch eine Langerhans-Insel (helle Zellen), die von exokrinem Drüsengewebe umgeben ist.

tätigen Endstücke der Drüse, wo die Protein sezernierenden Zellen ein einschichtiges Drüsenepithel um die feinsten Enden der verzweigten Ausführungsgänge herum bilden (Abb. 3C). Eingebettet in das exokrine Drüsengewebe liegen die Langerhans-Inseln als endokrine Zellgruppen (Abb. 3D), denn diese Zellen geben als wesentliche Sekretionsprodukte die Hormone Insulin, Glukagon und Somatostatin in die Blutbahn ab. Zur Aufnahme dieser Hormone enthalten die Inseln ein dichtes Kapillarnetz.

Der Mensch verfügt vermutlich über 1–2 Millionen Langerhans-Inseln, die einen Durchmesser von 100–200  $\mu\text{m}$  haben und nur etwa 1 bis 3% des Pankreasgewebes ausmachen. Histologisch unterscheiden sich die verschiedenen Zelltypen der Langerhans-Inseln nicht sichtbar (Abb. 3D). Erst immunocytochemische Arbeiten konnten zeigen, dass etwa 70% der Inselzellen so genannte  $\beta$ -Zellen sind. Sie liegen in den Inseln mehr zentral (Abb. 3B), wirken als Glukose-Sensoren und produzieren Insulin. Das Hormon Glukagon bilden die in den Inseln mehr peripher liegenden  $\alpha$ -Zellen, die etwa 20% des Inselgewebes ausmachen. Ein dritter Zelltyp ( $\delta$ -Zellen) macht nur circa 10% des Inselgewebes aus und produziert das Hormon Somatostatin, das unter anderem die Insulin- und Glukagonsekretion hemmt.

### **Diabetes mellitus – die Zuckerkrankheit**

In Deutschland leiden etwa vier Millionen Menschen an Diabetes (weltweit sind es über 170 Millionen Menschen), mehr als 90% von ihnen unter Typ-2 Diabetes. Diese Form der Zuckerkrankheit wird auch als Alters-Diabetes bezeichnet. Bei dieser Form reagiert der Körper aufgrund mannigfaltiger Ursachen nur noch unzureichend auf die körpereigene Insulinausschüttung. Der Typ-1 Diabetes ist wesentlich

seltener und tritt meist vor dem 40. Lebensjahr auf, weil die  $\beta$ -Zellen in den Langerhans-Inseln aufgrund einer autoimmunen Reaktion zerstört wurden. Obwohl es sich bei beiden Diabetes-Formen eigentlich um ganz unterschiedliche Erkrankungen handelt, teilen sie als auffälligstes Zeichen den zu hohen Blutzuckerspiegel.

### **Technische Hinweise**

Die Hämalaun-Eosin-gefärbten Präparate für die Abbildungen 3C und D stammen aus der Präparatesammlung der Universität Potsdam (Allgemeine Zoologie) und von Carolina Biological Supply Company, Burlington, NC, USA. Für die Mikrofotografie wurde ein Zeiss Axioskop verwendet (Hellfeldbeleuchtung; Objektiv: Plan-Apochromat 63/1.4  $\text{Öl}$ ; Zeiss-High-End-Kameraadapter für Canon PowerShot G5).

### **Literaturhinweise**

- Boron, W. F., Boulpaep, E. L. (eds.): Medical Physiology. Elsevier, Philadelphia 2005.  
 Jolles, S.: Paul Langerhans. Journal of Clinical Pathology 55, 243–245 (2002).  
 MacDonald, P. E., Rorsman, P.: Oscillations, intercellular coupling, and insulin secretion in pancreatic b cells. PLoS Biol. (4)2, e49 (2006).  
 Pliska, V., Folkers, G., Eberle, A. N.: Insulin – eine Erfolgsgeschichte der modernen Medizin. BioFokus 69, 1–15 (2005).  
 Welsch, U.: Lehrbuch der Histologie. Urban & Fischer Verlag, München 2003.

### **Internetseiten**

- <http://www.uniklinikum-giessen.de/med3/history/langerh/langerh.htm>  
<http://www.discoveryofinsulin.com/Home.htm>

*Verfasser:* Prof. Dr. Bernd Walz, Siedlungsweg 3, 14469 Potsdam, E-Mail: [walz@uni-potsdam.de](mailto:walz@uni-potsdam.de)

## Mikro-Lyrik

### Gastraeisches

Es geschah Ende des vergangenen Jahres in den Räumen des Zoologischen Instituts der Humboldt-Universität Berlin anlässlich eines Festkolloquiums mit anschließender Feier eines runden Geburtstages, dass der Jubilar Dr. Wolfgang Dohle, Zoologieprofessor der Freien Universität Berlin im (Un-)Ruhestand, ein vergilbtes Blatt aus seiner Jackentasche zog, um ein

selbstverfasstes Gedicht vorzutragen. Zuvor erklärte er, dass es vor langer Zeit, nämlich im Jahr 1960, seine Premiere erlebt habe, als er es im Rahmen eines Universitätsinstitutsfests zu vorgerückter Stunde in der dortigen Zoologie, wo er damals an seiner Dissertation arbeitete, vorgetragen habe. Dann rezitierte er:

*Es sprach einst der Gastraeemann zu der Gastraeadame,  
von der ihm völlig unbekannt war Stand sowie auch Name.  
Doch war es nachts bei Dunkelheit in dem Laurentiameere  
da dacht er, dass die Ehrbarkeit nicht groß geschrieben wäre.*

*Er dachte noch nicht ethisch,  
er war bloß hypothetisch.*

*Es war die Nacht so planktonklar, so richtig unterseeisch,  
da juckte ihm das Ektoderm, er sagte auf gastraeisch:  
Mein Fräulein, Ihre Formen haben mich total entzückt,  
die volle Rundung Ihres Ektoderms hat mich berückt.*

*Ach könnte ich's erreichen,  
darüber sanft zu streichen!*

*Ihr hübscher blonder Wimperschopf hat mir so imponiert  
und Ihre Cilien, welche so synchron sind onduliert.  
Und seh ich erst durch Ihre Haut, durchsichtig wie Nylon,  
wird mir ganz schwummerig vor so viel Invagination.*

*Ich bin ganz hingerissen,  
will Ihren Urmund küssen!*

*Doch als er thigmotaktisch nun versucht ihr nah zu kommen,  
kehrt sie ihm ihren Urmund zu und ist davongeschwommen.  
Denn als sie ihn recht perzipiert, da dachte sie: Ne, laß ma!  
Denn faltig war sein Epithel und runzelig sein Plasma.*

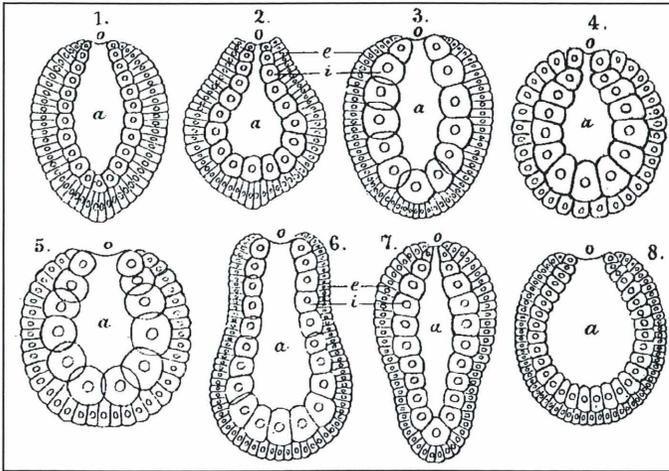
*Und dieser Lustgreis hatte  
schon eine Scheitelplatte.*

*Er zog sich ganz geknickt zurück in irgendein Versteckel  
und fluchte auf sein Alter und seinen Schöpfer Haeckel.  
Kein Keimblatt nahm er vor den Mund, er sagte: Es ist Hohn:  
Kein Auge, keine Nerven an der ganzen Konstruktion.*

*Und zu dem größten Schaden  
noch nicht einmal Gonaden.*

*Oh Mensch in deiner Eitelkeit, bedenke aber dieses:  
Du stammst von der Gastraea ab, und bei Herrn Haeckel lies es.  
Wer weiß, ob in Millionen Jahren man nicht dereinst wird lesen,  
wie unwahrscheinlich primitiv die Menschen sein gewesen.*

*Dann bist du nicht viel meha  
als heute die Gastraea!*



**Abb. 1:** Schematische Illustration der Gastraea-Theorie anhand der Gastrula-Formen acht verschiedener Organismen: 1 Kalkschwamm, 2 Actinie (Hexacoralia), 3 Turbellar, 4 Ascidie (Tunicata), 5 *Lymnaea* (Gastropoda), 6 Asteroidee (Echinodermata), 7 Nauplius-Entwicklung (Crustacea), 8 *Amphioxus* (Chordata). a Urdarm, e Ectoderm (Dermalblatt), i Entoderm (Gastralblatt), o Urmund (aus Haeckel, 1874).

Die Geburtstagsgäste – zu einem beträchtlichen Teil Insider, sprich Biologen – amüsierten sich köstlich über dieses gelungene Dichtwerk. Wussten sie doch genau, worum es ging, nämlich um die im Jahr 1874 von Ernst Haeckel, dem berühmten Zoologen aus Jena, aufgestellte Gastraea-Theorie (Abb. 1). Es war bei vielen Tiergruppen beobachtet worden, dass sie zu Anfang ihrer Individualentwicklung nach der Befruchtung der Eizelle und den sich anschließenden Zellteilungen (Furchungen) ein Morula-Stadium (Maulbeerkeim, ungeordneter Zellhaufen) durchlaufen, das in ein Blasenkeimstadium übergeht. Dieser Keim, genannt Blastula, besitzt eine einschichtige Zellschicht (Blastoderm), welche einen Hohlraum, nämlich die primäre Leibeshöhle umgibt. Ein zweischichtiges, aus so genannten Keimblättern (Ektoderm und Entoderm) bestehendes Gastrula-Stadium entsteht durch die Einstülpung der Blastula. Die Einstülpungsstelle wird zum Urmund. Schwämme

(Porifera) und Hohltiere (Coelenterata) verharren auf dieser Organisationsstufe. Alle weiteren Vielzeller – den Menschen eingeschlossen – bilden schließlich sekundäre Leibeshöhlen (Cölome) aus, die von einem dritten Keimblatt (Mesoderm) umgeben werden. Da viele Metazoen das Gastrulastadium durchlaufen, postulierte Haeckel einen ähnlich gebauten Vorfahren, den er Gastraea nannte.

Zum nächsten runden Geburtstag erwarten wir ein weiterentwickeltes Gedicht, das den dreikeimblättrigen Organisationsstufen Tribut zollt.

#### Literaturhinweis

Haeckel, E.: Die Gastraea-Theorie, die phylogenetische Classification des Tierreichs und die Homologie der Keimblätter. *Jenaische Zeitschr. Naturwiss.* 8, 1–55 (1874).

Redaktion MIKROKOSMOS

## Nachricht

### Juli 2007: Plankton-Wochenende in Berlin

Am Wochenende 7.7./8.7.2007 führt die Berliner Mikroskopische Gesellschaft (BMG) am und um den Heiligensee (im Nordwesten Berlins) eine Planktonerhebung durch. Interessenten erhalten Auskünfte über Programm, Unterkunft und Kosten von:

Günther Zahrt (Kyllmannstr. 7a, 12203 Berlin, Tel.: 030/8 33 69 17, E-Mail: [gm.zahrt@t-online.de](mailto:gm.zahrt@t-online.de)) oder Prof. Dr. Klaus Hausmann (Rothenburgstr. 27b, 12165 Berlin, Tel.: 030/83 85 64 75, E-Mail: [hausmann@zedat.fu-berlin.de](mailto:hausmann@zedat.fu-berlin.de)).

# Technische Realisation digitaler Mikrofotografie mit handelsüblichen Consumer-Digitalkameras

## Teil 1: Allgemeine Aspekte, Verwendung von Kompakt- und Bridgekameras

Jörg Piper

Zur Zeit der analogen Fotografie hatten alle namhaften Hersteller mikroskopischer Geräte verschiedene systemkonforme Komponenten entwickelt, um analoge Kameras an Mikroskope adaptieren zu können. Am gebräuchlichsten waren Vorrichtungen zur Adaptation von Kleinbildkameras (Filmformat  $24 \times 36$  mm); zusätzlich existierten auch Module zur Verwendung von Polaroid-Kameras, Mittel- und Großformat-Kameras. Auf diese Weise war die Möglichkeit gegeben, eine analoge Kamera, die in der Regel auch für andere fotografische Zwecke nutzbar war, bei Bedarf für die Mikrofotografie einzusetzen.

Neben diesen nach dem Baukastenprinzip konzipierten Modulen existierten auch spezielle fotografische Apparaturen, die ausschließlich zur Verwendung am Mikroskop vorgesehen waren und für sonstige fotografische Aufgabenstellungen nicht eingesetzt werden konnten. Diese Apparate boten gegebenenfalls einen vermehrten Komfort in ihrer Handhabung. Die erhältlichen Bildresultate waren jedoch qualitativ vergleichbar, da identisches Filmmaterial verwendet wurde und die abbildende und beleuchtende Optik identisch war. Im Hinblick auf die digitale Mikrofotografie wurden bislang vergleichbare Adaptationen zur Verwendung handelsüblicher Digitalkameras seitens der maßgeblichen Hersteller nicht beziehungsweise nur in geringer Bandbreite realisiert. In diesem Segment dominieren spezielle digitale Kameraaufsätze, welche entsprechend ihrem früheren analogen Pendant nur am Mikroskop verwendbar sind und unter wirtschaftlichem Aspekt in einem deutlich höheren Preissegment liegen als digitale Kompakt- oder Spiegelreflexkameras für den Consumer-Bereich.

Andererseits sind die heutzutage erhältlichen Digitalkameras hinsichtlich ihrer Chiptechnologie und optischen Qualität so ausgereift, dass sie früheren analogen Kameras nicht nachstehen. Darüber hinaus bietet eine digitale Fotodokumentation unter verschiedenen Aspekten der Praktikabilität handfeste Vorteile im Vergleich zur analogen Fotografie (z. B. direkte Kontrolle und Verfügbarkeit des Bildes, digitale Bildnachbearbeitung, schneller Bildtransfer via

Internet). Unter diesen Aspekten erscheint es wünschenswert, Digitalkameras auch zur Mikrofotografie einzusetzen, sofern die erhältlichen Ergebnisse denen der analogen Fotografie vergleichbar sind. Im Folgenden sollen daher verschiedene Varianten solcher Kameraverwendungen vorgestellt werden, die sich in der alltäglichen Praxis bewährt haben. Die konkret dargelegten Realisationsbeispiele erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit; sie sollen lediglich exemplarisch die aktuell bestehenden Möglichkeiten verdeutlichen.

In einem ersten Teil dieses Beitrages werden allgemeine technische Aspekte erörtert, welche Vergleichsziehungen zur analogen Mikrofotografie einschließen. Hierauf aufbauend werden verschiedene in der Praxis bewährte und erprobte Methoden dargestellt, handelsübliche digitale Kompakt- und Bridge-Kameras am Mikroskop zu verwenden. Ein zweiter Teil des Beitrages geht auf die Einsatzmöglichkeiten digitaler Spiegelreflexkameras und Besonderheiten der mikroskopischen Elektronenblitz-Fotografie ein.

### Praxisrelevante theoretische Aspekte

#### Adaption

Bei der analogen Kleinbild-Mikrofotografie wurden üblicherweise Kameras mit Wechseloptik verwendet, meist Spiegelreflex-Kameras, in Einzelfällen auch geeignete Messsucher-Kameras, zum Beispiel aus der Leica M-Serie. Die

kameraeigene Optik wurde jeweils entfernt; die Kameras wurden in geeignetem Abstand oberhalb des Okulars/Fotookulars platziert. Sofern Fotookulare höherer Sehfeldzahl verwendet wurden (Sehfeldzahl 18 oder höher), konnte prinzipiell auf eine zusätzliche Optik verzichtet werden. Die Optik der Kamera wurde folglich ersetzt durch die Optik des Mikroskops. Bei speziellen Kameraadaptoren (z.B. Leitz/Leica Combiphot) konnten auch speziell gerechnete Optiken erforderlich sein, die als Fotoobjektive zwischen Okular und Kamera zu schalten waren, um einen geeigneten Bildausschnitt zu realisieren.

Auf dem Sektor der Digitalkameras existieren bislang keine Messsucherkameras mit entfernbarer Optik. Daher können nur digitale Spiegelreflexkameras in Analogie zu der oben beschriebenen Montage analoger Kameras an einem Mikroskop verwendet werden. Kompakt- und Bridge-Kameras sind hingegen so am Mikroskop zu adaptieren, dass sich unter Beibehaltung der kameraseitigen Optik brauchbare Ergebnisse erzielen lassen.

### **Verschluss und Auslösung**

Ein besonderes technisches Problem stellte schon zu früherer Zeit die Gefahr von Verwacklungen durch den Auslösevorgang dar. Daher war die Kamera entweder berührungsfrei über dem Mikroskop zu montieren, dies unter Inkaufnahme aufwändiger und voluminöser Konstruktionen, oder es waren vorzugsweise spezielle adaptierende Komponenten zu verwenden, in denen ein erschütterungsfrei gelagerter Zentralverschluss (Compurverschluss) integriert war (z.B. Combiphot-Kamerasysteme von Leitz/Leica). Im letztgenannten Fall diente die analoge Kamera lediglich als Filmtransportgehäuse. Vor der beabsichtigten Mikroaufnahme war der Kameraverschluss auf Langzeitbelichtung (B) einzustellen. Nachdem der Verschluss geöffnet war und sämtliche hierdurch hervorgerufenen Erschütterungen abgeklungen waren, wurde die eigentliche Aufnahme durch Betätigen des erschütterungsfreien Zentralverschlusses realisiert. Die Belichtungsmessung wurde üblicherweise durch integrierte Messsysteme sichergestellt.

Auch bei der digitalen Fotografie bestehen grundsätzlich auslösungsbedingte Erschütterungsgefahren, vor allem bei Verwendung digitaler Spiegelreflexkameras. Auch wenn mit

Spiegelvorauslösung gearbeitet wird, kann das Öffnen und Schließen des Verschlusses selbst zumindest im mittleren und hohen Vergrößerungsbereich je nach Art der Kameraadaptation zu Verwacklungsunschärfen führen. Digitale Kompakt- und Bridge-Kameras, welche über keine auswechselbaren Objektive verfügen und nicht nach dem Spiegelreflexsystem arbeiten, lösen deutlich erschütterungsärmer aus. Mehrheitlich verursacht der Verschluss einer solchen Kompaktkamera weniger Erschütterungen als der Auslösevorgang einer digitalen Spiegelreflexkamera nach Spiegelvorauslösung.

### **Chip versus Film**

Ein weiteres Problem ergibt sich aus dem Umstand, dass anstelle eines fotografischen Films ein lichtempfindlicher Chip belichtet wird. Bekanntermaßen reagieren die Chips digitaler Kameras besonders empfindlich auf schräg einfallende bildgebende Strahlenanteile. In diesem Fall können Blooming-Artefakte (punktuelle Überbelichtungen und Lichthöfe infolge Streustrahlung), mangelhafte Bildschärfe und Farbsäume entstehen (Altmann, 2003). Ein fotografischer Film reagiert vergleichsweise robust im Hinblick auf schräg einfallende Strahlenkomponenten. Diese gesteigerte Empfindlichkeit der Chips gegenüber schräg einfallendem Licht ist bei der Adaptation einer Digitalkamera zu berücksichtigen.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Dimensionierung der üblicherweise in Digitalkameras befindlichen Chips deutlich niedriger liegt als das Kleinbildformat von  $24 \times 36$  mm. Eine Ausnahme stellen lediglich Vollformat-Sensoren dar, welche sehr kostspielig sind und aus konstruktiven Gründen auch ihre besonderen Probleme im fotografischen Grenzbereich aufweisen (z.B. gesteigerte Vignettierung infolge technisch bedingtem Helligkeitsabfall zum Rand des Bildes). Tabelle 1 stellt vergleichend die ungefähren Längen- und Flächenmaße eines Kleinbildfilms und verschiedener handelsüblicher digitaler Chips dar. Hieraus ergibt sich, dass eine technische Konstruktion, die bei Adaptation einer Kleinbildkamera eine optimale Abmessung des aufzunehmenden mikroskopischen Bildes ergibt, bei identischer Verwendung einer Digitalkamera zu deutlich kleineren Bildausschnitten führt. Qualitätsverluste infolge Leervergrößerung können die Folge sein.

**Tabelle 1: Maße gebräuchlicher Sensoren im Vergleich zum Kleinbild (Zahlen gerundet). Die Größenangabe bezieht sich auf die jeweilige Bilddiagonale, welche dem Durchmesser eines geometrisch anlegbaren Umkreises entspricht. 1 Zoll  $\cong$  2,54 cm, aber im CCD-Bereich gilt: 1 Zoll  $\cong$  ca. 1,6 cm! (Stefanus, 2006; Steinhauser, 2006).**

	Länge	Breite	Diagonale	Fläche
Kleinbild/Vollformat-Chip	36 mm	24 mm	43 mm	8,6 cm <sup>2</sup>
APS-Chip (z. B. Eos 350 D, 20 D)	23 mm	15 mm	26 mm	3,5 cm <sup>2</sup>
Four-Thirds (z. B. Olympus SLR)	17 mm	13 mm	21 mm	2,2 cm <sup>2</sup>
2/3-Zoll (z. B. Leica Digilux 2)	9 mm	6,5 mm	11 mm	0,6 cm <sup>2</sup>
1/2-Zoll (diverse Kompakt-Digitalkameras)	6,5 mm	5 mm	8 mm	0,3 cm <sup>2</sup>

### Bildauflösung

Das Auflösungsvermögen des jeweiligen Kameraschips ist neben einer qualitativ hochwertigen Optik und einer optimierten Signalverarbeitung ein wesentlicher, die Qualität bestimmender Faktor. Speziell bei Verwendung von Stereomikroskopen oder Lupenobjektiven ergibt sich eine sehr hohe Informationsdichte des Bildes, welche durchaus der üblichen bildgebenden Fotografie vergleichbar ist.

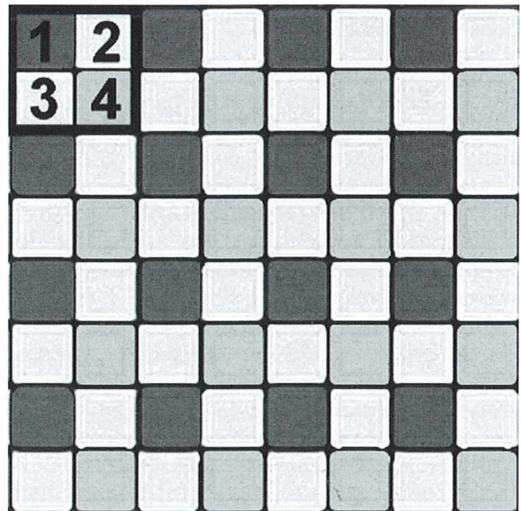
In der analogen Mikrofotografie sollten Filme niedriger Empfindlichkeit und entsprechender Feinkörnigkeit bevorzugt werden, um bei Einsatz qualitativ hochwertiger Optik die gegebenen Details des Objektes verlustfrei zu dokumentieren. Folglich sollten die digitalen Chips in ihrer Auflösung so bemessen sein, dass sie hinsichtlich der resultierenden Bildqualität einem feinkörnigen Kleinbildfilm entsprechen oder nahe kommen.

In der analogen Kleinbildfotografie liegt die fotografisch realisierte Bildauflösung nach Literaturangaben durchschnittlich bei etwa 50 Linienpaaren pro mm; als maximal möglicher oberer Grenzwert gelten 100 Linienpaare pro mm. Ein durchschnittliches Zoom-Objektiv löst etwa 40 Linienpaare pro mm auf. Eine Hochleistungs-Festbrennweite kann etwa 60 Linienpaare pro mm auflösen. Übertragen auf die Digitalfotografie entsprechen 40 Linienpaare pro mm etwa 5,5 Megapixel, 50 Linienpaare 8,5 Megapixel und 60 Linienpaare 12 Megapixel. Folglich sollte eine Digitalkamera Auflösungen von 5,5–12 Megapixel realisieren lassen, um die Bandbreite von durchschnittlichen Zoom-Objektiven bis zu Hochleistungs-Festbrennweiten abzudecken. Ein tragfähiger Kompromiss, welcher den durchschnittlich realisierten etwa 50 Linienpaaren pro mm im Kleinbildbereich entspricht, ergibt sich bei etwa 8 Megapixel.

### Farbkodierung und Interpolierungsartefakte

Weiterhin ist unter theoretischem Aspekt zu berücksichtigen, dass bei einem Kleinbildfilm die gesamte Fläche des Films in vollem Umfang für die drei Grundfarben zur Verfügung steht, die zur Realisierung von Farbaufnahmen benötigt werden, indem drei den Grundfarben entsprechende lichtempfindliche Schichten übereinander gelagert werden.

In digitalen Consumer-Kameras werden die einzelnen Pixel des Chips jedoch den drei Grundfarben entsprechend mit Farbfiltern versehen, wobei vier benachbarte Chips jeweils eine Einheit bilden. Zwei dieser Chips werden



**Abb. 1: Ausschnitt eines Farb-Chip mit Farbfiltern gemäß Bayer-Schema. Ein farbkodierendes Pixel-Quartett ist durch Umrandung in der linken oberen Bildecke hervorgehoben. 1 Blaufilter, 2 und 3 Grünfilter, 4 Rotfilter. Die Anzahl der Grünlicht kodierenden Pixel liegt doppelt so hoch wie die Anzahl der Blau- und Rotlicht kodierenden Pixel.**

mit grünen Farbfiltern versehen und je ein angrenzender Chip mit einem roten und blauen Farbfilter (sog. Bayer-Schema; Altmann, 2003). Folglich werden im Falle eines Farbchips 50% der vorhandenen Pixel von Grünanteilen erregt und jeweils 25% von Rot- beziehungsweise Blauanteilen (Abb. 1).

Übertragen auf die Mikrofotografie bedeutet dies, dass bei Verwendung einer 8 Megapixel-Kamera im Falle eines rot oder blau eingefärbten Objektes lediglich 2 Megapixel auf direktem Wege zur Bildentstehung beitragen. Für die 75% verbleibenden Pixel, die nicht auf direktem Wege belichtet (erregt) werden, interpoliert die Kamera Bildinformationen, welche sie aus dem Belichtungsmuster der vorhandenen rot beziehungsweise blau kodierenden Pixel ableitet. Diese Interpolierung führt im fotografischen Grenzbereich zu Qualitätseinbußen bei Vergleichsziehung zu einem entsprechenden Bild, welches real durch direkte Belichtung von 8 Megapixel zustande käme. Diese Einbußen können sich in Konturunschärfen, Stufenbildungen und Farbsäumen im Randbereich von Konturen äußern. Diese Artefakte zeigen sich vor allem bei hohen Ausschnittsvergrößerungen und Erstellung großformatiger Bildabzüge.

### **Sonstige Artefakte**

Weitere Probleme der digitalen Fotografie können im Einzelfall in Abhängigkeit von den Eigenschaften des vorhandenen Chips durch sichtbares Bildrauschen entstehen. Dieses ist vor allem von der eingestellten ISO-Empfindlichkeit, der Temperatur und Größe der Chips abhängig. Es kommt zustande, wenn sich der Chip bei längerer Belichtung zunehmend erwärmt und steigt mit zunehmender Lichtempfindlichkeit, das heißt hohen ISO- beziehungsweise ASA-Werten. Moiré-Artefakte, die vor allem bei der digitalen Bildwiedergabe bestimmter konstanter Muster entstehen, spielen üblicherweise in der biologisch-medizinischen Mikrofotografie keine relevante Rolle.

Unter theoretischem Aspekt wird vielfach auch die Fläche des Chips beziehungsweise die Größe des einzelnen Pixels als die Qualität bestimmendes Merkmal herausgestellt. Grundsätzlich darf als physikalische Gesetzmäßigkeit betrachtet werden, dass ein digitales Bild bei ansonsten gleichen Aufnahmebedingungen umso weniger Rauschen, Blooming-Artefakte und Farbverschiebungen zeigt, je größer der

verwendete Chip beziehungsweise die Größe des einzelnen bilderzeugenden Pixels ist. Bei identischer Pixelzahl wird folglich ein großflächig dimensionierter Chip die qualitativ besseren Ergebnisse bringen.

Dieses physikalische Grundgesetz relativiert sich allerdings zurzeit, da die Methoden der elektronischen Signaloptimierung zunehmend verbessert werden. Dies verringert den Stellenwert der Chipfläche beziehungsweise Pixelgröße unter Aspekten der praktischen Relevanz.

Speziell im Hinblick auf die digitale Mikrofotografie wurden von verschiedenen Autoren Ringartefakte beschrieben (Henkel, 2003). Es handelt sich hierbei um konzentrische, wechselweise helle und dunkle Ringe, die vor allem bei gleichmäßig hellen Bildflächen und kontrast-schwachen Objekten entstehen können. Nach Maßgabe mehrerer Autoren sind diese Ringartefakte abhängig von der verwendeten Kamera. Der genaue Entstehungsmechanismus dieser Artefakte ist bislang nicht geklärt. Aufgrund eigener Untersuchungen darf jedoch als weitgehend sicher gelten, dass es sich um Interferenzphänomene handelt, die an Linsengrenzflächen entstehen. Solche Ringartefakte wurden in der analogen Mikrofotografie nicht beschrieben.

### **Prinzipielle Vorteile der digitalen Mikrofotografie**

Trotz der erwähnten potentiellen Schwierigkeiten bietet die digitale Mikrofotografie verschiedene handfeste Vorteile bei Vergleichsziehung zu analogen Mikrofotografie. Zunächst ist evident, dass die mikroskopische Aufnahme direkt und unmittelbar zur Verfügung steht, wobei auch der Erfolg der jeweiligen Aufnahme direkt nach Auslösen des Bildes beurteilt werden kann. Sollte die Aufnahme misslungen oder nicht optimal sein, können daher in gleicher Sitzung seriell Aufnahmen mit veränderten Aufnahmeparametern erstellt werden, bis das Optimum realisiert ist.

Die Lichtempfindlichkeit einer Digitalkamera (ISO-Zahl) ist für jede einzelne Aufnahme bei Erfordernis den individuellen Gegebenheiten entsprechend anpassbar, wobei mehrere moderne Kameras ISO-Bereiche zwischen ISO 100 und ISO 1600 oder ISO 3200 abdecken. Unter der Voraussetzung eines qualitativ hochwertigen Chips mit geringem Hintergrundrauschen

kann die Verwendung solch hoher ISO-Werte von Vorteil sein, wenn bei bestimmten Beleuchtungsarten wenig Licht zur Verfügung steht. Auch kann mit Hilfe einer veränderlichen ISO-Zahl zu einer Verkürzung der Belichtungszeit und hiermit einer Reduktion von bewegungsabhängigen Bildunschärfen beigetragen werden.

Die meisten Digitalkameras verfügen über ausgereifte Möglichkeiten eines automatischen oder manuell anpassbaren Weißabgleiches, weshalb auf die Verwendung von Conversionsfiltern verzichtet werden kann.

Mit Hilfe der üblicherweise vorhandenen Bildbearbeitungs-Software kann die Qualität des mikroskopischen Bildes bei Erfordernis im Sinne eines Post-Processings verbessert werden (Optimierung von Helligkeit, Kontrast, Farbsättigung, Farbton, Schärfe, Gradationskurve beziehungsweise Histogramm, Retouchierung von störenden Elementen wie Staubpartikeln, Luftblasen etc.).

In speziellen Anwendungsbereichen, beispielsweise der Histo- und Cytopathologie, können digital dokumentierte mikroskopische Befunde bei Bedarf in pathologische Befundberichte integriert werden. Sofern im schwierigen Einzelfall Befunde unsicher einzuordnen sind, könnten grundsätzlich digitale Mikrofotos auf unkomplizierte Weise für histopathologische telemedizinische Konferenzen verwendet werden.

Außerhalb des Spiegelreflex-Segmentes ist die Mehrzahl der handelsüblichen Digitalkameras mittlerweile auch in der Lage, in passablen Qualitäten, welche der Fernsehnorm entsprechen oder nahe kommen, Video-Clips zu drehen. Daher können bei Verwendung einer solchen Digitalkamera am Mikroskop auch Bewegungsabläufe in mittlerweile recht guter Qualität auf schnelle und unkomplizierte Weise dokumentiert werden.

Schließlich können beispielsweise für Lehrzwecke erstellte digitale Mikrofotos und Video-Clips mittels Beamer oder Fernsehmonitoren in technisch unkomplizierter Weise demonstriert werden.

### **Praktische Vorteile der Schwarzweiß-Digitalfotografie**

Wie vorstehend ausgeführt, sind die Pixel auf den Kamera-Chips den drei Grundfarben entsprechend nach dem so genannten Bayer-Mus-

ter angeordnet (je 25% der Pixel für rot und blau, 50% für grün). In speziellen Situationen, bei denen eine Farbfotodokumentation nicht erforderlich erscheint, könnte die Auflösung und Konturschärfe durch eine Fotografie im Schwarzweiß-Modus verbessert werden. Zu diesem Zweck sollte zweckmäßigerweise das mikroskopische Bild im Grünlicht beleuchtet werden. Dies würde gewährleisten, dass immerhin 50% der vorhandenen Pixel auf direktem Wege angesteuert werden und zur Bildentstehung beitragen. Interpolationen beziehen sich folgerichtig in diesem Fall nur noch auf die verbleibenden sonstigen 50% der vorhandenen Pixel. Zusätzlich können Kontraststeigerungen und Verbesserungen der Konturschärfe erreicht werden, wenn die Schwarzweiß-Aufnahme unter Einschaltung eines elektronischen Grünfilters vorgenommen wird. Diese Einstellmöglichkeiten sind beispielsweise in den digitalen Spiegelreflex-Kameras von Canon realisiert.

Speziell in Fällen, bei denen das mikroskopische Bild dominierend aus Rot- oder Blautönen besteht – dies ist bei vielen histologischen und bakteriologischen Routinefärbungen der Fall – könnte durch die Konversion in ein Grünbild und Aufnahme im Schwarzweiß-Modus die Anzahl der direkt zur Bildentstehung beitragenden Pixel näherungsweise verdoppelt werden.

### **Verwendung von Kompakt- und Bridge-Kameras**

#### **Technische Aspekte**

Diese Kameras müssen, da ihr Objektiv nicht entfernbar ist, grundsätzlich mit der kameraeigenen Optik am Mikroskop adaptiert werden. Kompaktkameras haben den Vorteil eines geringen Gewichtes und einer meist erschütterungsfreien Auslösung. Bridge-Kameras sind aufwändiger und voluminöser konstruiert, da sie die Brücke zu den Spiegelreflex-Kameras schließen sollen. Sie ermöglichen meist umfangreichere, auch manuelle Einstellungsvarianten. Der Zoom-Bereich dieser Kameras liegt meist deutlich über demjenigen der Kompaktkameras.

Bei beiden Kameratypen existieren keine Normmaße hinsichtlich der Objektiv-Chip-Abstände beziehungsweise der objektivseitigen Pupillendistanzen. Daher unterscheiden sich diese Kameras auch bei identischem

Zoom-Bereich manchmal beträchtlich im Hinblick auf ihre Verwendbarkeit für die Mikrofotografie.

Viele der aktuell auf dem Markt befindlichen so genannten Mega-Zoom-Kameras sind für die Verwendung am Mikroskop unbrauchbar. Trotz eines sehr kurzen minimalen Objektabstandes und beträchtlicher Teleeinstellungen sind diese Mega-Zoom-Optiken oft nicht in der Lage, das Gesichtsfeld eines herkömmlichen mikroskopischen Fotookulars adäquat abzubilden. Hier resultiert in vielen Fällen bei allen in Betracht kommenden Einstellungen nur ein winziger runder Lichtfleck, welcher fotografiert werden könnte, oder es zeigen sich stark ausgeprägte Vignettierungen.

Hinzu kommt, dass jedes Zoom-Objektiv einen optischen Kompromiss bei Vergleichsziehung zu Festbrennweiten darstellt; je höher der Zoom-Bereich, desto höher auch die optischen Kompromisse. Aus diesem Grunde bieten Kompaktkameras mit kleinen oder mittelgradigen Zoom-Bereichen bei Verwendung am Mikroskop meist bessere Ergebnisse.

Da jede manuelle Auslösung einer Kamera zu unweigerlichen Erschütterungen mit Verwacklungsunschärfen führt, sollte die Digitalkamera idealerweise über die Möglichkeit einer Fernauslösung verfügen. Falls dies nicht gegeben ist, verbleibt nur die Alternative, mit Selbstauslöser zu fotografieren. Es ist bekannt, dass erschütterungsbedingte Schwingungen durchaus zwei bis vier Sekunden benötigen können, um vollständig abzuklingen. Daher empfiehlt sich, die Latenzzeit des Selbstauslösers auf längere Zeiten, zum Beispiel 10 Sekunden einzustellen.

Da der Stromverbrauch der Kompakt- und Bridge-Kameras deutlich höher als bei digitalen Spiegelreflex-Kameras liegt und die Digitalkamera während der mikroskopischen Sitzung in aller Regel permanent eingeschaltet bleibt, ist es vorteilhaft, wenn die Kamera mit einem externen Netzteil zur Batterie- beziehungsweise Akku-unabhängigen Stromversorgung bestückt werden kann.

Die qualitätsbestimmenden Parameter sollten bei jeder Digitalkamera bei Verwendung am Mikroskop grundsätzlich auf maximale Qualität eingestellt werden, da diese im Zweifelsfall gerade gut genug ist. Die ISO-Zahl sollte unter Aspekten eines möglichst geringen Bildrauschens so niedrig wie möglich und hoch wie nötig eingestellt werden.

### **Bestimmung von Schärfe und Bildausschnitt**

Die Schärfefokussierung erfolgt primär mit Hilfe des Kameradisplays. Die Qualität des Display-Bildes muss hinreichend sein, um eine exakte Bestimmung der Schärfenebene vornehmen zu können.

Mehrere Kompaktkameras bieten die Möglichkeit, das Bild des Displays als Life-Bild über ein USB-Kabel auf den Monitor eines PC zu übertragen. Diese USB-Bilder sind nach eigener Erfahrung qualitativ nicht befriedigend. Sie sind allenfalls geeignet, den Bildausschnitt festzulegen, für eine exakte Fokussierung der Schärfe jedoch nicht hinreichend.

Alternativ kann bei den meisten Kompaktkameras das Display-Bild auch über ein AV-Kabel auf den Monitor eines PC übertragen werden, wenn eine entsprechend ausgerüstete Grafikkarte oder TV-Karte zur Verfügung steht. Die Kamerahersteller haben unterschiedlichen Aufwand betrieben, dieses AV-Kabel-Bild qualitativ zu optimieren. Im geeigneten Fall kann mittels AV-Übertragung auf einen hoch auflösenden Computer-Monitor eine Vollbilddarstellung des mikroskopischen Bildes erreicht werden, welche die Qualität USB-basierter Monitorbilder übertrifft und für eine Schärfesteuerung hinreichend ist. Der Monitor des PC sollte auf hohe Auflösung eingestellt werden. Wenn die Graphikkarte automatische Zeileninterpolation ermöglicht, kann hierdurch die Gesamtqualität des Monitorbildes sichtbar verbessert werden.

Sofern trinokulare Fototuben vorhanden sind, lässt sich in der Regel auch ein Schärfefeinabgleich des binokular beobachtbaren Bildes mit dem Display-Bild der Digitalkamera durch einmaliges Justieren realisieren. Diese Abstimmung der Schärfenebene kann auf verschiedenen Wegen erreicht werden, die auch kombinierbar sind: Bestückung des Binokulartubus mit Brillenträgerokularen, deren Augenlinse verstellbar ist, Veränderung der Okular-Einschubtiefe am Binokulartubus, Variierung des Kameraabstandes beziehungsweise der Einschubtiefe des Fotookulars, gegebenenfalls Veränderung der Feldlinsen-Position im Fototubus, falls eine manuell verstellbare Feldlinse vorhanden ist, Variierung der Entfernungseinstellung am Kameraobjektiv im manuellen Fokussierungsmodus.

Die Schärfefokussierung des Kameraobjektivs ist üblicherweise auf unendlich einzustellen, da dies der Akkomodation des menschlichen

Auges beim entspannten Sehen entspricht und die üblicherweise verwendeten mikroskopischen Okulare entsprechend gerechnet sind.

Andererseits kann im Einzelfall ohne sichtbare Qualitätsverluste auch eine andere Entfernungseinstellung am kameraseitigen Objektiv vorgenommen werden, wenn dies aus anderen Gründen vorteilhaft sein sollte (z. B. Ausschaltung etwaiger Randvignettierungen, Feinjustierung des Schärfabgleichs).

Die Belichtung des Bildes vollzieht sich über die Belichtungsautomatik der Kamera. Da die Automatik nicht in jedem Fall eine exakte Belichtung beim ersten Bild liefert, sollte die Kamera über eine möglichst fein abgestufte Belichtungskorrektur (Override) in einem Bereich von mindestens  $\pm$  zwei Blendenstufen verfügen. Alternativ kann vorteilhaft sein, sämtliche Belichtungsparameter manuell einzustellen.

Neben der Schärfjustierung dient das Kameradisplay der Bestimmung des Bildausschnittes. Wenn das Objektiv der Kamera bei adäquater Bildausleuchtung noch einen gewissen Zoom-Spielraum besitzt, kann mit Hilfe des kameraseitigen Zooms durchaus bei weitgehend gleich bleibender Qualität eine Veränderung des Bildausschnittes in Analogie zu einem Vario-Okular durchgeführt werden.

Grundsätzlich können digitale Kameras auch an speziell für die Mikrofotografie gerechnete Vario-Okulare anstelle fest vergrößernder Fotookulare adaptiert werden. In diesem Fall kann bei gleich bleibender Schärfefokussierung und konstanter Objektivbrennweite über einen meist weiten Verstellbereich der Bildausschnitt über das Vario-Okular verändert werden (z. B.  $5,0$  oder  $6,3 \times$  bis  $12,5 \times$  bei Leitz/Leica Vario-Okularen).

Unter Aspekten der Ergonomie ist ein schwenkbares Kameradisplay wünschenswert, damit ohne wesentliche Veränderung der Arbeitsposition zwischen der binokularen Beobachtung und dem Betrachten des Kamera-Displays gewechselt werden kann.

### Adaption

Die Adaptation der Digitalkamera am Mikroskop kann grundsätzlich auf unterschiedlichem Wege realisiert werden. Auf einfache Weise können einige Kameras mittels externer Kameraadapter über dem Fotookular befestigt werden (Abb. 2). Diese Adapter liegen kostenmäßig meist im zweistelligen Euro-Bereich, sind

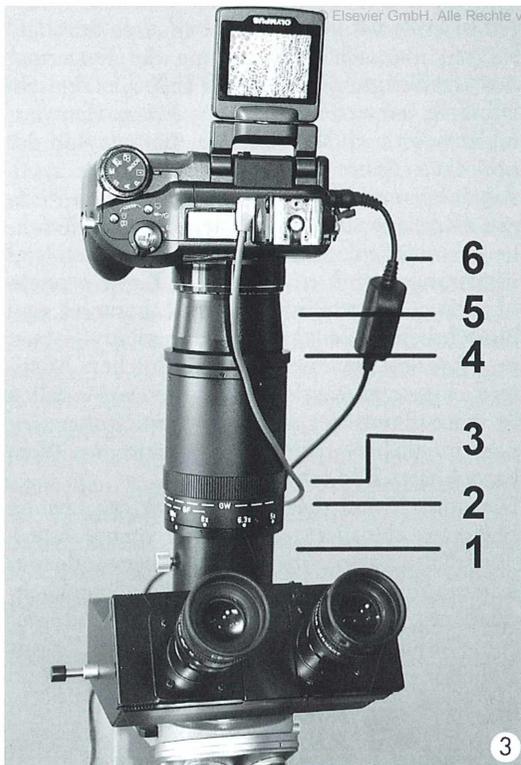
somit sehr preiswert. Als entscheidender Nachteil ist zu erwähnen, dass bei einer so durchgeführten manuellen Befestigung die Justierung des Strahlenganges nicht zu 100% exakt sein kann. In jedem Fall werden gewisse Zentrierfehler oder auch Winkelabweichungen von der optischen Achse unvermeidbar sein. Je nach Art des kameraseitigen Chips und der jeweiligen Objektivrechnung werden diese Justierfehler entweder toleriert oder mit erheblichen Vignettierungen beziehungsweise Randverzeichnungen quittiert. Einige Kompaktkameras sind hinsichtlich dieser Justierfehler relativ robust und können grundsätzlich mit solchen Adaptern eingesetzt werden, bei anderen Modellen ist trotz minutiöser manueller Bemühungen einer möglichst fehlerfreien Justierung kein brauchbares Bild erhältlich.

Die optisch und mechanisch exaktere Lösung besteht in der direkten achsgerechten Adaptation der Kamera über das Filtergewinde des Kameraobjektivs oder (besser) über einen nachrüstbaren, mit Gewinde versehenen Adapter zur Aufnahme von Konvertern. Solche als Zubehör erhältlichen Adapter werden meist an der Basis des Kameraobjektivs eingeschraubt (z. B. Olympus Camedia C 7070, Abb. 3; Canon Powershot A-Serie, Abb. 4) oder mittels Klemmfassung am Stativgewinde befestigt (z. B. Canon Powershot S-Serie, Abb. 5).

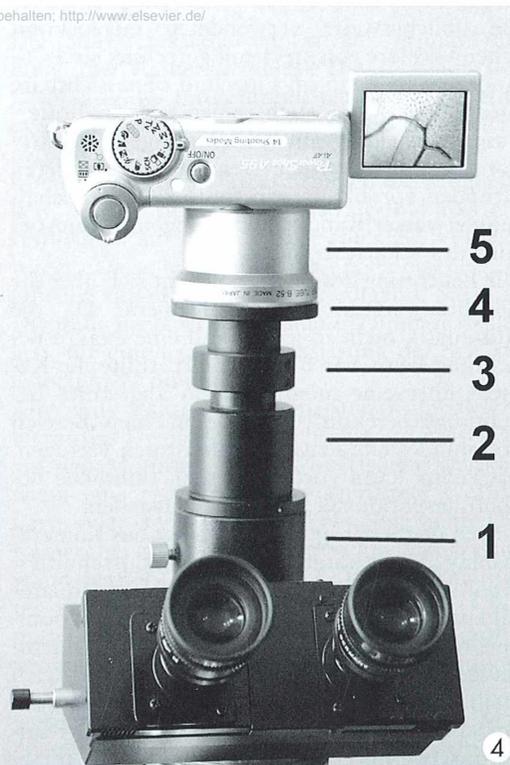
Bei dieser direkten Adaptation der Kamera sollte möglichst ein Fotookular zur Verfügung stehen, welches in Höhe der Augenlinse mit einem Gewinde versehen ist. Dies trifft beispiels-



**Abb. 2: Montage einer Kompaktkamera (Casio Exilim EX-Z 110) mittels einfachem, externem Kameraadapter an einem Monokulartubus mit Fotookular.**



3



4

**Abb. 3:** Adaptation einer Bridge-Kamera (Olympus Camedia- C7070) mittels Direktverschraubung an einem Vario-Fotookular. 1 Stützen des trinokularen Fototubus (Leitz/Leica FSA-Tubus); 2 Leitz/Leica Vario-Okular mit Drehfassung zur stufenlosen Vergrößerungswahl (Verstellbereich: 5× bis 12,5×); 3 X-Synchronkabel zur entfesselten Blitzlichtauslösung; 4 Adapter-Ringscheibe der Firma Promicron (Sonderanfertigung), Innengewinde 45 mm, Außengewinde 52 mm; 5 Einschraubbarer Kameraadapter zur Aufnahme von Convertern (Anschlussgewinde: 52 mm); 6 Anschlusskabel für Netzadapter. – **Abb. 4:** Montage einer Kompaktkamera (Canon Powershot A 95) mittels Direktverschraubung an einem Promicron-Fotookular. 1 Trinokularer Fototubus (Leitz/Leica FSA-Tubus); 2 Monokularer Stützen zur Aufnahme eines Fotookulars; 3 Promicron-Fotookular für Normstutzen 23 mm mit Anschlussgewinde 28 mm; 4 Promicron-Adapter-Ringscheibe, Innengewinde 28 mm, Außengewinde 52 mm; 5 Ansetzbarer Kameraadapter zur Aufnahme von Convertern, Gewindemaß 52 mm.

weise zu für verschiedene Leitz-Periplan-Brillenräger-Okulare mit Sehfeldzahlen von 18 oder 20 (Abb. 6a und b), alternativ auch für die Leitz-Vario-Okulare, welche allerdings ein abweichendes Gewindemaß aufweisen (Abb. 7a und b).

Es existieren feinmechanische Produzenten, die bereit und in der Lage sind, einem Kunden einen zu Kamera und Fotookular passenden mechanischen Adapter mit exakt geschnittenem Gewinde in Einzelanfertigung zu liefern, wenn das jeweilige Fotookular zu diesem Zweck eingeschickt wird (Fa. Promicron, Kirchheim/Neckar).

Standardisiert können passende Adapterscheiben für Filterdurchmesser M 52 und M 58 bezogen werden. Bei kameraseitig abweichenden Filterdurchmessern kann in aller Regel ein passender Filteradapter (beispielsweise über die Firma Hama) als Zusatzkomponente beschafft werden. Da bei einer solchen direkten Verschraubung der Kamera am Fotookular das Okular selbst frei drehbar bleibt, kann auf elegante Weise die Ausrichtung der Kamera an die Position des Objektes angepasst werden, analog dem Wechsel von Quer- zu Hochformat in der Alltagsfotografie.



**Abb. 5:** Montur zur Adaptation einer Canon Powershot S 80 an einem Leitz/Leica Periplan Brillenträgerokular mit Gewindefassung. 1 Canon-Adapter LA-DC 20 zur Aufnahme von Convertern, Gewinde­maß 37 mm, Schraube für Stativgewinde rechts, Klemmbügel links; 2 Hama-Filteradapter, Innenge­winde 37 mm, Außengewinde 52 mm; 3 Promicron-Adapter-Ringscheibe, Außengewinde 52 mm, Innengewinde 28 mm; 4 Leitz/Leica Brillenträgerokular Periplan GF 10fach mit augenseitigem Gewinde, 28 mm. – **Abb. 6:** Leitz/Leica Periplan-Brillenträger-Okular 10×, Sehfeldzahl 18. a Okular ohne Adap­terring, 1 Drehfassung zur Verstellung der Augenlinse; 2 Gewinde, 28 mm. b Dasselbe Okular mit Adaptern zum Anschluss an Filtergewinde 55 mm. 1 Promicron-Adapter-Ringscheibe, Innengewinde 28 mm, Außengewinde 58 mm; 2 Hama-Filteradapter, Außengewinde 58 mm, Innengewinde 55 mm.

Falls kein Fotookular des Mikroskopherstellers mit augenseitigem Gewinde zur Verfügung steht, können auch zu bestimmten Kameratypen passende Fremdokulare mit entsprechen­den Gewinden von Drittherstellern bezogen werden (z. B. Firma Promicron, Abb. 8a und b). Tabelle 2 fasst alle Forderungen zusammen, die eine digitale Kompakt- oder Bridge-Kamera möglichst erfüllen sollte.

### Erprobte Modelle

In eigener Anwendung haben sich im prakti­schen Einsatz folgende Kameras bestens be­währt, die daher beispielhaft erwähnt werden sollen.

#### **Olympus Camedia C 7070 (Abb. 3)**

Diese Bridge-Kamera verfügt über einen sehr leistungsfähigen Chip mit niedrigem Rauschen und guter Detailauflösung (7,1 Megapixel), kombiniert mit einem gut gerechneten Zoom-Objektiv mittlerer Verstellweite. Die Kamera lässt sich über einen Adapterring, der eigentlich zur Verwendung von Weitwinkel- und Telekon­verttern vorgesehen ist, mit einem Promicron-

Adapterring stabil am Gewinde eines 10fach vergrößernden Leitz-Periplan-Brillenträger-Okulars adaptieren. In gleicher Weise kann die Kamera über einen modifizierten Promicron-Adapterring, der in Einzelanfertigung herstell­bar ist, an Leitz-/Leica-Vario-Fotookularen eingesetzt werden. In Verbindung mit einem Leitz-/Leica-FSA-Fototubus ist bei dieser Montur eine automatische Abgleichung der Schärfe zwischen binokularem Bild und Kameradisplay gewährleistet. Sämtliche Einstellungen (Belich­tung, Entfernung, Belichtungskorrektur, ISO-Zahl, Weißabgleich) können manuell vorge­nommen werden. Die Kamera ist mittels Infra­rot-Fernauslöser erschütterungsfrei auslösbar. Über den vorhandenen Blitzschuh mit Mitten­kontakt kann auch am Mikroskop Elektronen­blitzfotografie betrieben werden (kürzeste Blitzsynchronisationszeit 1/2000 Sek.).

Von bewegten Objekten können bei guter Bild­schärfe und exakter Belichtung auch in schwie­rigen Beleuchtungssituationen mit 15 Bildern pro Sekunde passable mikroskopische Filme erstellt werden. Die Länge der Filme wird nur durch die Kapazität der verwendeten Speicher­karte limitiert. Näherungsweise kann kalkuliert werden, dass pro Sekunde Film ein Megabyte benötigt wird. Die Filme werden im AVI-For-

**Tabelle 2: Praktische Anforderungen an eine Digitalkamera zur Mikrofotografie**

### Auslösung

- Möglichst erschütterungsfrei
- Selbstauslöser
- Fernauslöser oder Fernsteuerungs-Software (Remote Capture)

### Fokussierung

- Über Display
- Über Monitor (AV-Übertragung)
- Manueller Modus (Autofokus abschaltbar)

### Belichtung

- Automatisch und manuell (Blende und Verschlusszeit frei wählbar)
- Belichtungskorrektur (Override über möglichst  $\pm 2$  Blendenstufen)

### Stromversorgung

- Möglichst über Netzteil (hoher Stromverbrauch im Dauerbetrieb)

### ISO-Wert

- Manuell wählbar
- Minimum: ISO 100–400
- Optimal: ISO 100–1600 oder 3200

### Chip

- 5–8 Megapixel
- geringes Rauschen, hohe Farbtreue
- gute Auflösung und Konturschärfe

### Adaption

- Filtergewinde am Objektiv (mit gängigem Gewinde-Normmaß)
- Adapterring für Converter als Zubehör

### Display

- Hinreichende Größe und Auflösung
- Möglichst klapp- beziehungsweise schwenkbar

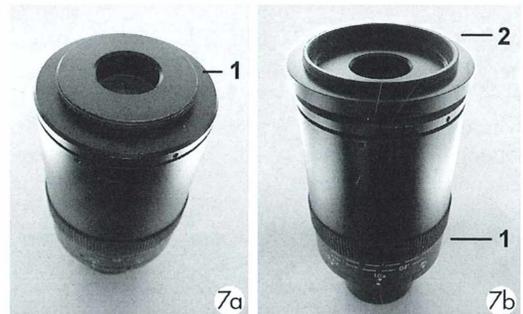
### Blitzbelichtung

- Anschluss eines X-Synchronkabels beziehungsweise Blitzschuh mit Mittenkontakt zur Aufnahme eines Adapters
- Möglichst kurze Blitz-Synchronzeit
- Bei SLR: Möglichst Synchronisation auf den 2. Verschlussvorhang

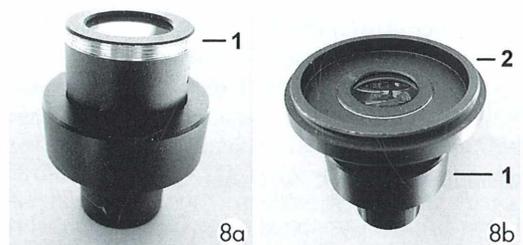
### Objektiv

- Bei Nicht-SLR: 3–4fach-Zoom guter Korrektur, welches das Sehfeld eines Brillenträgerokulars mit Sehfeldzahl 18 vignettierungsfrei und bildfüllend wiedergeben sollte (Praxistest erforderlich)

mat erstellt, sind daher wie herkömmliche digitale Videofilme mit entsprechender Software am PC bearbeitbar. Einzelbilder können als JPG-Aufnahmen am PC extrahiert werden. Das Display der C 7070 ist schwenkbar und zeigt eine gute Qualität, so dass mit hinreichender Genauigkeit die Schärfe fokussiert werden kann. Mittels AV-Kabel kann alternativ im Vollbildmodus eine Übertragung auf einen PC-Bildschirm realisiert werden. In diesem Fall kann die Schärfe auch Monitor kontrolliert fokussiert werden.



**Abb. 7: Leitz/Leica Vario-Fotookular (Vergrößerungsbereich 5× bis 12,5×). a Okular ohne Adapter. 1 Anschlussgewinde, 45 mm. b Dasselbe Okular mit Adapter-Ringscheibe, Sonderanfertigung der Firma Promicon. 1 Drehfassung zur Verstellung der Okular-Vergrößerung; 2 Adapter-Ringscheibe der Firma Promicon, Innengewinde 44 mm, Außengewinde wahlweise 52, 55 oder 58 mm je nach Filterdurchmesser der verwendeten Kamera.**



**Abb. 8: Promicon-Fotookular für Standard-Adapter 23 mm. a Okular ohne Kameraadapter. 1 Augenseitiges Gewinde, 28 mm. b Dasselbe Okular mit Promicon-Adapter-Ringscheibe, Innengewinde 28 mm, Außengewinde wahlweise 52 oder 58 mm.**

### Canon Powershot A 95 (Abb. 4), S 70, S 80

Die Powershot A 95 kann über einen Adapter zur Aufnahme von Weitwinkel- und Telekonvertern mit Gewindedurchmesser 52 mm in analoger Weise an den vorerwähnten Fotookularen adaptiert werden, wie vorstehend beschrieben. Die Auflösung des Bildes liegt bei dem hier verwendeten 5 Megapixel-Chip etwas niedriger als bei der C 7070; auch das über AV-Kabel an einem Monitor erhältliche Vollbild steht demjenigen der C 7070 ein wenig nach. Dennoch lassen sich auch mit der Powershot A 95 im passabler Qualität Mikrofotos erstellen. Auch diese Kamera verfügt über einen der C 7070 vergleichbaren Video-Modus, wobei allerdings die Video-Aufnahmen der C 7070 im direkten Vergleich eine etwas bessere Durchzeichnung zeigen.

Ebenso wie bei der C 7070 sind auch bei der Powershot A 95 alle relevanten Aufnahmeparameter manuell einstellbar. Eine direkte erschütterungsfreie Auslösung der Kamera kann allerdings nur PC-gestützt erfolgen, wenn die Kamera mittels USB-Kabel mit dem PC verbunden wird und spezielle Steuerungs-Software (Capture-Software) verwendet wird. Eine Capture-Software der Firma Canon gehört zum Lieferumfang, alternativ können auch komfortablere Programme von Fremdherstellern (z. B. Breeze-Capture) verwendet werden. Ansonsten können erschütterungsfreie Auslösungen über den vorhandenen Selbstauslöser erfolgen. Eine direkte Fernauslösung, wie bei der C 7070, ist nicht möglich.

Da kein externer Blitzkontakt zur Verfügung steht, kann ein Elektronenblitz zur Blitzlichtfotografie nur als Slave-Blitz ausgelöst werden, wenn der in die Kamera integrierte Blitz bei der Mikroaufnahme eingeschaltet bleibt.

Die Modelle der Powershot S-Serie, zum Beispiel Powershot S 70 und S 80, können in ähnlicher Weise wie beschrieben verwendet werden, wobei der kameraseitige Adapter als Klemmadapter ausgelegt ist, der am Stativgewinde verschraubt wird. Die S 70 verfügt im Unterschied zur S 80 über eine Infrarot-Fernauslösung. Die S 80 bietet einen Videomodus mit 30 Bildern pro Sekunde. Die Auflösung beider Kameras liegt mit 7 beziehungsweise 8 Megapixeln etwas höher als die der A 95.

Auf Grund ihres geringen Eigengewichtes können die Powershot A 95 beziehungsweise S 70/80 in Kombination mit einem 10fach ver-

größernden Fotookular (z. B. Leitz/Leica Periplan GF-Brillenträger-Okular oder Promicon-Fotookular) auch mit guten Resultaten an Stereomikroskopen mit Binokulartubus zur Lupefotografie verwendet werden, wenn der Tubusstutzen eines der beiden Beobachtungsokulare hierfür verwendet wird (Abb. 9). Zwecks Vermeidung von auslösungsbedingten Erschütterungen sollte bei manueller Betätigung des Auslösers vorzugsweise mit Selbstauslöser gearbeitet werden.

### Casio Exzirim EX-Z 110 (Abb. 2)

Diese ultraleichte und absolut erschütterungsfrei auslösende Kompaktkamera verfügt über einen gut zeichnenden 6-Megapixel-Sensor. Das Objektiv dieser Kamera ist so gerechnet, dass eine brauchbare Adaptation der Kamera mittels einfachen mechanischen Digitalkamera-Adaptern möglich ist. Unvermeidbare verbleibende zentrier- und achsenbezogene Ausrichtungsfehler werden von dieser Kamera erstaunlich gut toleriert. Auch bei dieser Kamera sind

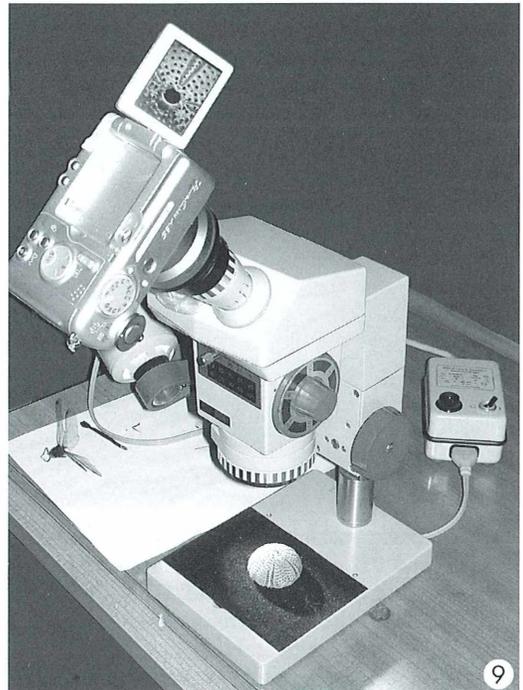


Abb. 9: Canon Powershot A 95 mit Promicon-Fotookular 10× am Binokulartubus eines Stereomikroskops.

alle relevanten Einstellungsfunktionen manuell steuerbar. Wie bei der Olympus C 7070 steht auch hier ein Netzteil zur externen Stromversorgung zur Verfügung.

Die Kamera verfügt über keine Möglichkeit der erschütterungsfreien Direktauslösung, weshalb hier mit dem Selbstauslöser gearbeitet werden muss. Wie bei der Powershot A 95 ist auch bei dieser Kamera kein Blitzkontakt vorhanden, weshalb ein Elektronenblitz nur über den integrierten Kamerablitz im Slave-Modus gezündet werden kann.

Der besondere Reiz der Casio-Kamera liegt in den Filmqualitäten. Die Kamera ist in der Lage,

in Fernsehnorm-Qualität Video-Clips beliebiger Länge mit 30 Bildern pro Sekunde aufzunehmen. Zusätzlich verfügt die Kamera im Video-Modus über eine automatische Helligkeitsanpassung, welche bei niedriger Beleuchtungsstärke in sehr differenzierter Weise die Helligkeit des erhältlichen Films nachverstärkt. Daher können mit dieser Kamera auch bei schwachen Beleuchtungsstärken, beispielsweise bei hohen Vergrößerungen im Dunkelfeld exakt belichtete Filme guter Qualität erstellt werden. Diese Filme sind im AVI-Format hinterlegt, so dass beliebige Nachbearbeitungen und bei Bedarf Extraktionen von Einzelbil-

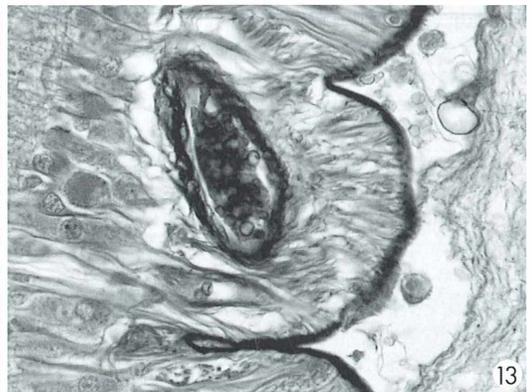
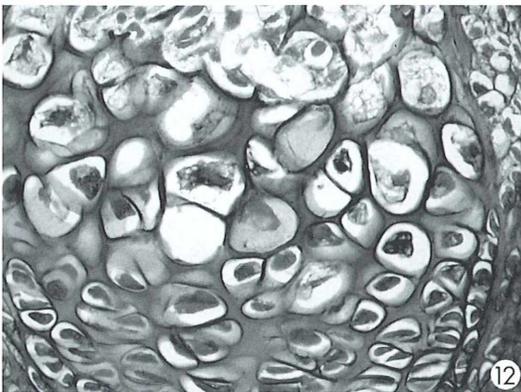
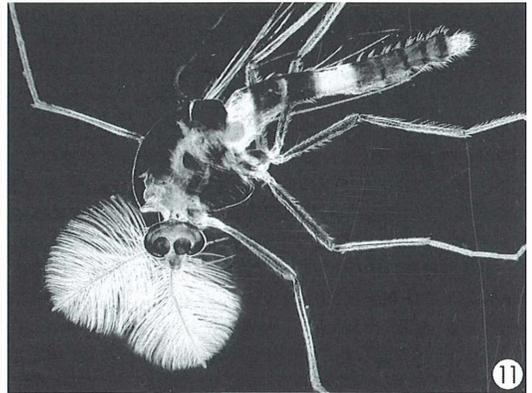
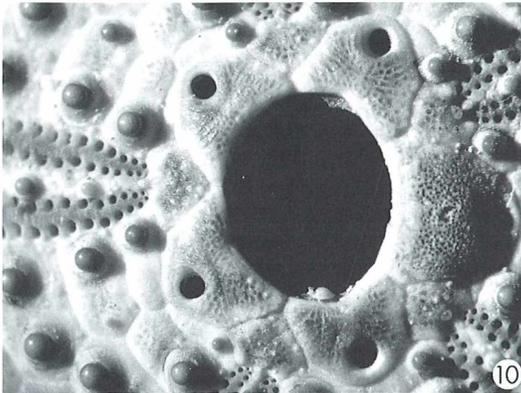


Abb. 10: Seeigelskelett, Aufsicht, Stereomikroskop, Objektiv 1,6 $\times$ , Promicron-Okular 10 $\times$ , Canon Powershot A 95, automatische Mehrfeldmessung, Selbstauslöser, Adaptation gemäß Abbildung 9. – Abb. 11: Zuckmücke, Dunkelfeld, Objektiv Plan 2,5 $\times$ , Leitz/Leica-Variookular 5 $\times$ , Olympus Camedia C 7070, automatische Mehrfeldmessung, drahtlose Fernauslösung, Adaptation gemäß Abbildung 3. – Abb. 12: Mausembryo, embryonaler Knorpel der Wirbelsäule, Hellfeld, Objektiv NPL Fluotar 40 $\times$ , Leitz/Leica Brillenträger-Okular Periplan GF 10 $\times$ , Olympus Camedia C 7070, automatische Mehrfeldmessung, drahtlose Fernauslösung, Adaptation gemäß Abbildung 3. – Abb. 13: Netzhaut des Menschen, Hellfeld, Objektiv NPL Fluotar 40 $\times$ , Leitz/Leica Periplan-Okular GF 10 $\times$ , Casio Exilim EX-Z 110, automatische Mehrfeldmessung, Selbstauslöser, Adaptation mittels externem Digitalkamera-Adapter (vgl. Abb. 2).

dern möglich sind. Mit einer 1-Gigabyte-Speicherkarte lassen sich bei dieser Kamera etwa 12 Minuten Film aufnehmen.

## Diskussion

Die Digitalfotografie hat derzeit einen Leistungsstand erreicht, der bei geeigneter Auswahl der technischen Komponenten digitale Mikrofotos ermöglicht, deren Qualität analogen Kleinbildfotos entspricht. Die Abbildungen 10 bis 13 zeigen exemplarisch einige Ergebnisse hier vorgestellter Kameras. Qualitativ hochwertige Farbabzüge im Format DIN A4 sind bei direktem Vergleich durchaus gleichformatigen Farbdrukken analoger Bildvorlagen gleichwertig. Wenn für die Aufnahmen Kamera-Chips in einem Auflösungsbereich von etwa 7–8 Megapixel oder mehr zur Verfügung stehen, ergibt sich im Bereich der mikrofotografischen Anwendung eine wesentliche Vergrößerungsreserve.

Nicht-Spiegelreflexkameras bieten im Bereich der Mikrofotografie zwei nicht zu unterschätzende Vorteile: Eine erschütterungsfreie Direktauslösung und eine kontinuierliche Life-Beobachtung des aufzunehmenden Objekts im Display beziehungsweise auf einem zugeschalteten Monitor. Wesentlich erscheint auch, dass nach eigener Erfahrung die kürzest möglichen Blitzlicht-Synchronzeiten für beliebige handelsübliche Blitzgeräte bei Nicht-Spiegelreflexkameras aufgrund anderer konstruktiver Merkmale des Verschlusses (Compur-Verschluss) signifikant höher liegen können als bei handelsüblichen digitalen Spiegelreflexkameras (1/2000 Sek. gegenüber maximal ca. 1/360 Sek.).

Als weiterer Vorteil qualitativ hochwertiger Kompakt- und Bridge-Kameras kann gewertet werden, dass ohne Zusatzaufwand in passabler Qualität Farbvideaufnahmen von bewegten Objekten erstellt werden können. Meist werden digitale Video-Clips im AVI-Modus gespeichert. Dieser Speichermodus ist relativ Ressourcen fordernd. Andererseits ergeben sich bei den derzeit im Handel erhältlichen Speicherkarten hoher Kapazität (1–4 Gigabyte) Aufnahmezeiten in einer Größenordnung von 10–40 Minuten. Solche Aufnahmezeiten erscheinen für mikroskopische Dokumentationszwecke mehr als hinreichend. Als wesentlicher Vorteil ist zu werten, dass Videofilme im AVI-Modus mit jeder gängigen Videobearbeitungs-Software am PC nachbearbeitet werden kön-

nen. Die Nachbearbeitung erstreckt sich nicht nur auf Aspekte des Schneidens und Arrangierens von Szenen, sondern schließt auch alle praxisrelevanten Möglichkeiten der bildverbessernden Nachbearbeitung ein (z.B. Verbesserung von Schärfe, Helligkeit, Kontrast und Farbjustierung). Standbilder solcher AVI-Videos können als Einzelaufnahmen im JPG-Format extrahiert werden.

Aktuell wurden auch Kompaktkameras entwickelt, welche anstelle des AVI-Modus den MPEG-4-Modus für Videoaufnahmen mit einer Bildfrequenz von 30 Aufnahmen pro Sekunde verwenden. MPEG-4-Filme bieten nach Herstellerangaben eine volle VGA-Auflösung. Da die Datenkompression im MPEG-4-Verfahren deutlich höher als im AVI-Modus liegt, können bei gleicher Speicherkartenkapazität Videoaufnahmen von etwa 2,5–3,0facher Dauer aufgenommen werden. Je nach Wiedergabegröße des Videobildes sollen allerdings nach Literaturangaben MPEG-4-Videos aufgrund ihrer höheren Datenkompression AVI-Videos im direkten Vergleich qualitativ nachstehen. Daher muss gegenwärtig offen gelassen werden, ob sich die neuere MPEG-4-Video-technologie für eine qualitativ hochstehende digitale mikroskopische Filmdokumentation als qualitativ hinreichend erweisen wird.

Zunehmende Fortschritte der Mikroelektronik haben auch im Bereich der Kompakt- und Bridge-Kameras Modelle entstehen lassen, welche hinsichtlich der erhältlichen Bildqualität unter Aspekten der fotografischen Praxis durchaus an die deutlich großflächiger dimensionierten Chips digitaler Spiegelreflexkameras (APS- oder Four-Third-Chips) heranreichen. Die qualitative Grenzziehung zwischen Kompakt- und Bridge-Kameras einerseits und digitalen Spiegelreflexkameras andererseits wird sich daher zunehmend relativieren.

Aktuell wurde ein erster Bautyp einer Spiegelreflexkamera auf den Markt gebracht, welcher in Analogie zu einer Nicht-Spiegelreflexkamera eine kontinuierliche Beobachtung des Life-Bildes auf dem Kamera-Display erlaubt. Somit wird sich dieser bisherige Vorteil der Nicht-Spiegelreflexkameras zukünftig relativieren. Die deutlich erschütterungsärmere Auslösung, geringeres Gewicht, möglicherweise deutlich verkürzte Blitzlicht-Synchronzeiten bei beliebigen Blitzgeräten und Video-Optionen bleiben jedoch als Vorteile der Nicht-SLR-Kameras bestehen.

Hinsichtlich der erreichbaren ISO-Zahlen und der Rauschcharakteristik sind derzeit noch die großflächigeren Chips der digitalen Spiegelreflexkameras führend. Andererseits bestehen im Bereich der Kompakt- und Bridge-Kameras auch in dieser Hinsicht vielversprechende Weiterentwicklungen, so zum Beispiel ein Waben-Chip des Herstellers Fuji, der bei günstigem Rauschverhalten ebenfalls bereits ISO-Einstellungen bis 1600 ermöglicht.

Vor dem Hintergrund dieser Entwicklungen überwiegen sehr wahrscheinlich in Zukunft unter praxisrelevanten Aspekten die Vorteile der digitalen Nicht-Spiegelreflexkameras, vorausgesetzt, dass auch zukünftig Kameras mit günstig gerechneten Objektiven zu finden sind, die mit den spezifischen Gegebenheiten des mikroskopischen Strahlenganges gut korrespondieren.

Für spezielle Aufgabenstellungen, welche endgradige Auflösungen oder extreme Ausschnittsvergrößerungen erfordern, wird man wahrscheinlich auch in der weiteren Zukunft auf di-

gitale Spiegelreflexkameras, in diesem Fall vorzugsweise mit großformatigen Chips zurückgreifen müssen oder zu deutlich höherem Preis digitale Mikroskop-Aufsatzmodule einsetzen, die von den führenden Herstellern ausschließlich für diesen Verwendungszweck angeboten werden.

### Literaturhinweise

Altmann, R.: Digitale Fotografie und Bildbearbeitung. Kapitel Bildsensor, S. 20–24. Midas-Verlag, Zürich 2003.

Henkel, K.: Artefakte in Mikrofotografien. Internetseite: [www.mikroskopie-muenchen.de/coolpix-artefact-report.pdf](http://www.mikroskopie-muenchen.de/coolpix-artefact-report.pdf), 2003.

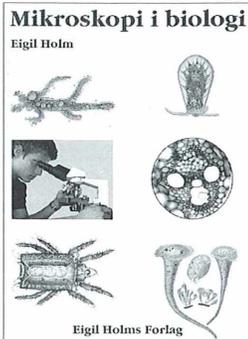
Stefanus, O.: Sensorgrößen und optisches System – Form follows Format. Leica Photographie International 3/2006, 40–47 (2006).

Steinhauser, M.: Digitalfotografie. Internetseite: [www.denfo.de/digitalfotografie.html](http://www.denfo.de/digitalfotografie.html), 2006.

Verfasser: Prof. Dr. med. Jörg Piper, Meduna-Klinik, Clara-Viebig-Str. 4, 56864 Bad Bertrich

## Buchbesprechungen

**Holm, E.: Mikroskopi i biologi.**  
Egил Holms Forlag, Gedved  
2006, 123 Seiten, 450 farbige  
Illustrationen, gebunden,  
€ ca. 32,00 (249 dän. Kr.),  
ISBN 87-89446-03-08.



Das in dänischer Sprache verfasste Buch möchte natürlich in erster Linie dänische Leser erreichen.

Anders als in Deutschland und im deutschsprachigen Umland gibt es in Dänemark keine Amateurvereinigungen, die sich der Mikroskopie verschrieben haben. Dem Autor Eigil Holm, seit vielen Jahren MIKROKOSMOS-Leser und Teilnehmer verschiedenster Mikroskopikertreffen in Deutschland, ist es ein Anliegen, dieses in seinem Heimatland zu ändern und die Mikroskopie in Dänemark zu popularisieren. Er hofft, dieses mit der vorliegenden Neuerscheinung bewirken zu können. Von meiner Warte aus kann ich überzeugt sagen, dass Aufmachung und Inhalt dieses Buchs voll und ganz dieser Zielsetzung entsprechen.

Nachdem grundlegende technische Zusammenhänge zur Mikroskopie und zur mikroskopischen Präparationstechnik dargelegt werden, geht es in medias res.

Neben der Besprechung der pro- und eukaryotischen Einzeller werden die verschiedensten Zell- und Gewebetypen von Vielzellern behandelt, seien sie pflanzlicher, seien sie tierischer Natur. Am Ende des Buches geht der Autor noch kurz auf die Historie der Mikroskopie ein. Ein Glossar, ein Literaturverzeichnis sowie ein Register beschließen das Werk. Inwiefern ist das Buch für unseren Sprachraum von Belang? Wir können in ihm sicherlich viele und neue Anregungen für das eigene Tun finden. Dazu muss man nicht die dänische Sprache im Detail beherrschen; ein einfaches Wörterbuch wird Hilfestellung genug sein. Sehen Sie zu, dass Sie bald Ihr eigenes Exemplar in Ihrem Bücherregal zu stehen haben!

Klaus Hausmann, Berlin

Mikrokosmos  
2/207

510543  
Bibliothek des OÖ.  
Landesmuseums

Museumstraße 14  
4020 Linz

1 (6)

300229

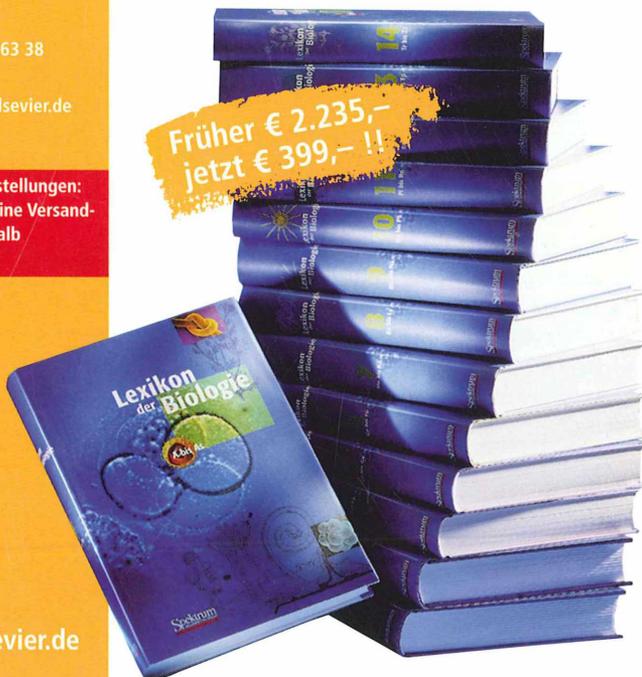
# öbste ie-Lexikon

Bestellen können Sie

- ▶ telefonisch:  
(0 70 71) 93 53 14
- ▶ per Fax:  
(0 62 21) 912 63 38
- ▶ per mail:  
bestellung@elsevier.de

Bei Online-Bestellungen:  
bis 31.3.07 keine Versandkosten  
innerhalb  
Deutschlands!

## ▶ Jetzt als preisgünstige Studienausgabe!!



### Das Lexikon der Biologie im Überblick:

- 14 Alphabetbände, ca. 480 Seiten pro Band, kart., im Schuber
- verfasst von über 220 namhaften Autoren
- ca. 75.000 Artikel und über 400.000 Verweise
- 1.000 biographische Artikel über bedeutende Forscher
- 57 vertiefende enzyklopädische Artikel zu aktuellen Themen, wie z. B. Biodiversität, Infektionskrankheiten, Schmerz
- Abbildung zeigt die gebundene Originalausgabe

### Gesamtausgabe Buch:

Früher € 2.235,-, jetzt € (D) 399,- /  
€ (A) 410,20 / sFr 611,-  
ISBN 978-3-8274-1736-7

### Gesamtausgabe CD-ROM:

Früher € 2.235,-, jetzt € (D) 399,- /  
€ (A) 412,80 / sFr 593,-  
ISBN 978-3-8274-1737-4

### Gesamtausgabe Buch + CD-ROM:

Früher € 3.352,50, jetzt € (D) 599,- /  
€ (A) 615,80 / sFr 918,-  
ISBN 978-3-8274-1738-1

www.elsevier.de



„Das Lexikon der Biologie wird seinen von Redaktion, Fachberatern und Autoren hochgesteckten Zielen 100%ig gerecht! Gratulation!“

Robert Huber

Prof. Dr. Robert Huber  
Nobelpreisträger für Chemie

Mit 14 Bänden ist das **Lexikon der Biologie** das weltweit größte alphabetische Nachschlagewerk zur Biologie. In ca. 75.000 Artikeln bietet es eine umfassende Orientierung und präzise Informationen zu allen Teildisziplinen der Biowissenschaften. Die große Bandbreite der Darstellung verdeutlichen einige **Stichwortbeispiele**: Alzheimersche Krankheit, Archaeobakterien, Autismus, Babysprache, Biotechnologie, BRCA1, Gammastrahlen, Kernspintomographie, Massentierhaltung, Prionen, SARS, Stammzellen, Vogelgrippe, Wasserverschmutzung. Über 50 enzyklopädische Artikel zu speziell ausgewählten, aktuellen Themen der Biologie, über 400 großenteils mehrfarbige Bildtafeln und ca. 100 neue Großtabellen unterstreichen die Qualität des Lexikons als einem ebenso inhaltlich anspruchsvollen wie visuell ansprechenden Nachschlagewerk.

Mit der kartonierten Studienausgabe sparen Sie € 1.836,- im Vergleich zur (gebundenen) Originalausgabe!!

## Wissen was dahinter steckt. Elsevier.

Sämtliche Preise verstehen sich zzgl. Versandkosten (Im Inland: € 3,50 pro Lieferung) – Preise unter Vorbehalt.

# ZOBODAT - [www.zobodat.at](http://www.zobodat.at)

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Mikrokosmos, Zeitschrift für Mikroskopie](#)

Jahr/Year: 2007

Band/Volume: [96\\_2](#)

Autor(en)/Author(s):

Artikel/Article: [Mikrokosmos 96\\_2 1](#)