

Zeitschrift: Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaften beider Basel
Herausgeber: Naturforschende Gesellschaft Basel ; Naturforschende Gesellschaft Baselland
Band: 16 (2016)

Artikel: Amöben - was heisst hier primitiv?
Autor: Mäser, Pascal
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-676539>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 04.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Amöben – was heisst hier primitiv?

PASCAL MÄSER

Zusammenfassung: Urtümlich, einfältig und hässlich? Das Bild der Amöbe bedarf dringend einer Korrektur. Die Amöbe schlechthin gibt es gar nicht; amöboide Zellen, mittels Pseudopodien sich bewegend und ernährend, sind in der Stammesgeschichte der Eukaryoten mehrmals und unabhängig voneinander entstanden. Heute bevölkern sie die verschiedensten Lebensräume an Land und zu Wasser. Manche sind Parasiten, andere dienen der körpereigenen Verteidigung: unsere Makrophagen, auch sie typisch amöboide Zellen. In diesem Aufsatz soll, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, die Bedeutung der Amöben anhand von Beispielen illustriert werden mit der Absicht, sie in ein besseres Licht zu rücken. Amöben zeigen soziales Verhalten und erbringen altruistische Hilfeleistung, und sie lösen anspruchsvolle mathematische Aufgaben.

Abstract: Amoeba – what do you mean, primitive? The amoeba is frequently used as a symbol of the primordial and primitive. This cliché, though widespread in art and science, is not justified. For one, there is no such thing as the bona fide amoeba. Amoeboid movement and ingestion by means of pseudopods has evolved independently in probably all of the major lineages of eukaryotes. Next to the amoebozoa and rhizaria, we also encounter amoeboid cells in the excavates, stramenopiles and opisthokonts. And even in our own body: the macrophages, amoeboid guardians of our blood and tissues. Among the vast diversity of amoebae, many surprise us with the delicate beauty of their shells and skeletons, with social and altruistic behavior, and with intelligence as demonstrated by mathematical skills in problem solving.

Key words: Amoeba, Entamoeba, Dictyostelium, Physarum, protozoa, evolution

Einleitung

Die einzellige Amöbe gilt gemeinhin als der Inbegriff von primitiv. Die Popkultur bedient sich ihrer gerne, und Filme wie «The Blob» (1958) oder der Auftritt von Amoeba-Man im Comic «Wonderwoman» (1961) haben nicht eben dazu beigetragen, das Bild der Amöbe zu verbessern. Aber auch Thomas Mann (1924)¹ oder Bertrand Russell (1914)² benutzten die Amöbe als ein Klischee für das Urtümliche. Zu verdanken hat die Amöbe ihren Ruf wohl der eigentümlichen Art von Fortbewegung und Nahrungsaufnahme. Mittels Pseudopodien (Scheinfüsschen) kriecht sie in alle Richtungen, umschliesst ihre ahnungslose Beute und verschlingt diese dann in einem Prozess der Phagozytose. Die Amöbe hat scheinbar keine Sinnesorgane, weder Mund noch After, kein Vorne, Hinten, Links oder Rechts. Allerdings gehört sie zu den Eukaryoten – das heisst sie besitzt einen Zellkern und ist somit stammesgeschichtlich weit entfernt von den urtümlichsten Zellen (welche prokaryotischer Natur gewesen sein mussten). Dass gewisse Arten von Amöben sehr alt sind, ist unbestritten und dokumentiert durch Funde fossiler Amöbenschalen im Grand Canyon aus dem Neoproterozoikum (Porter & Knoll 2000). Das bedeutet aber nicht, dass diese primitiv sind; vielmehr sollte es als ein Zeichen der Perfektion gedeutet werden, dass sich die Schalen dieser Amöben in den vergangenen 500 Millionen Jahren offenbar kaum verändert haben. Vollendete Perfektion treffen wir bei den skelettbildenden Amöben an, deren Gerüste mit zu den kunstfertigsten Formen der Natur gehören. Nichtsdestotrotz hält sich das Bild der primitiven Amöbe sogar in Kreisen der

Wissenschaft. Der vorliegende Aufsatz möchte zeigen, dass Amöben in keinerlei Hinsicht primitiv sind, weder phylogenetisch noch physiologisch. Im Gegenteil – manche Arten sind zu Höchstleistungen fähig: Sie zeigen soziales Verhalten, erbringen altruistische Hilfeleistung und lösen mathematische Probleme.

Vielfalt und Evolution amöboider Zellen

Amöben haben Taxonomen seit ihrer ersten Beschreibung durch August Johann Rösel von Rosenhof im Jahre 1755 (Abb. 1) vor Probleme gestellt. Die Vielfalt an Zellen, die sich mittels Pseudopodien bewegen oder ernähren, ist nur schwer zu erfassen. Da gibt es welche mit breiten (lobosen; Abb. 2a), fadenförmigen (filosen; Abb. 2b) oder verzweigten (retikulosen; Abb. 2c) Pseudopodien, gehäusebauende (Abb. 2d) sowie Amöben mit Stützskeletten (Abb. 2e). Zusätzlich kompliziert wird die Taxonomie durch die Tatsache, dass manche Amöben auch begeißelte Stadien ausbilden können (respektive, dass manche Flagellaten auch eine Amöbenform besitzen). Dies ist zum Beispiel bei *Naegleria* (Abb. 3) oder *Pfiesteria* der Fall und führte dazu, dass 1980 die Klassen *Sarcodina* (Amöben) und *Mastigophora* (Flagellaten) zum Stamm *Sarcomastigophora* vereint wurden (Levine et al. 1980). Der eminente Evolutionsbiologe Cavalier-Smith proklamierte zudem einen Stamm *Archamoebae* (Cavalier-Smith 1987) aufgrund des

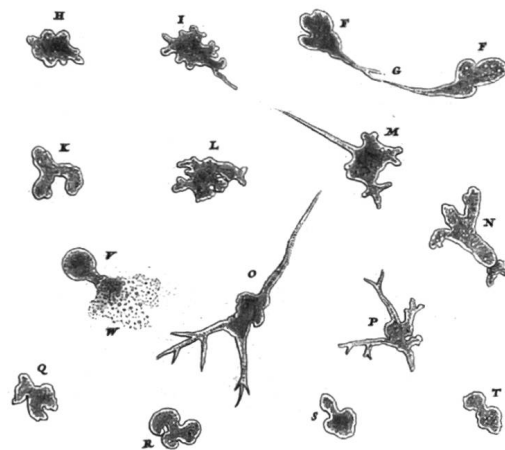


Abb. 1: Die erste Beschreibung einer Amöbe: August Johann Rösel von Rosenhof (1755) in seiner Zeitschrift *Monatlich herausgegebene Insektenbelustigungen*, Band 3, Seite 621.

¹ «Zwischen der scheinfüssigen Amöbe und dem Wirbeltier war der Abstand geringfügig, unwesentlich im Vergleich mit dem zwischen der einfachsten Erscheinung des Lebens und jener Natur, die nicht einmal verdiente, tot genannt zu werden, weil sie unorganisch war.» Thomas Mann, *Der Zauberberg*, 1924.

² «A process which led from the amoeba to man appeared to the philosophers to be obviously a progress – though whether the amoeba would agree with this opinion is not known.» Bertrand Russell, *Our Knowledge of the External World as a Field for Scientific Method in Philosophy*, 1914.

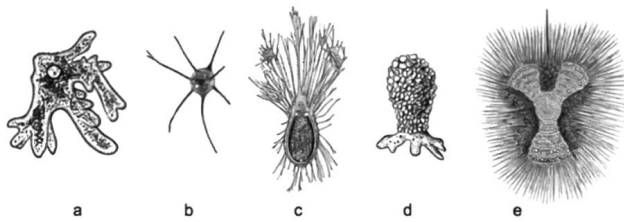


Abb. 2: Beispiele für die verschiedenen Erscheinungsformen von Amöben: a) lobose Pseudopodien bei *Amoeba proteus*, b) filose Pseudopodien, c) retikulose Pseudopodien bei *Gromia*, d) die beschaltete Amöbe *Diffugia*, e) *Euchitonia*, eine Amöbe mit Endoskelett.

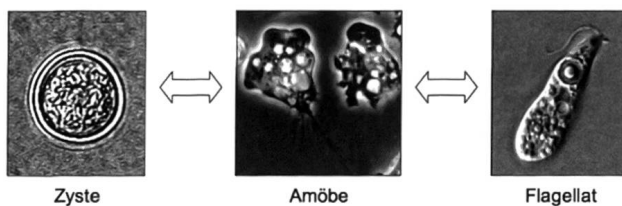


Abb. 3: Die verschiedenen Stadien von *Naegleria fowleri*: Links: inerte Zyste, Mitte: amöboider Trophozoit, rechts: Flagellat. Die beweglichen Formen haben einen Durchmesser von bis zu 40 µm, die Zyste von 10 µm.

Befunds, dass manche Amöben keine Mitochondrien besitzen. Mitochondrien sind die Kraftwerke der eukaryotischen Zelle, in ihnen finden die Verbrennungsprozesse statt (Schatz 2011). Sie enthalten ein eigenes Genom und sind von einer doppelten Membran umhüllt: Anzeichen dafür, dass die Mitochondrien aus einem prokaryotischen Endosymbionten hervorgegangen sind. Diese Adoption eines symbiontischen Bakteriums zu Mitochondrien war ein Schlüsselerignis in der Evolution der Eukaryoten. Aber wie kommt es, dass *Entamoeba histolytica*, die Erregerin der Amöbenruhr, keine Mitochondrien hat? Thomas Cavalier-Smith fasste dies als Indiz auf, dass sich die zu *Entamoeba* führende Linie vom Hauptstamm der Eukaryoten abgespalten hatte, bevor sich in diesem Mitochondrien entwickelten (Cavalier-Smith 1987). Daher der Name *Archamoeba*, die ursprüngliche. Wie falsch er damit lag, wurde spätestens dann klar, als das Genom von *E. histolytica* sequenziert worden war (Loftus et al. 2005). Darin fanden sich nämlich Gene eindeutig mitochondriellen

Ursprungs, wie jenes für das 60 kDa Chaperonin Cpn-60 (Clark & Roger 1995). Solche Gene zeugen davon, dass der Vorfahr von *Entamoeba* sehr wohl Mitochondrien besass, diese aber im Laufe der Evolution zurückgebildet wurden; wahrscheinlich als Anpassung an die parasitäre Lebensweise. Heute wird *Entamoeba* zusammen mit freilebenden mitochondrienhaltigen Genera gruppiert, das Reich *Archamoebae* hat sich geleert. Und stellt man an die Taxonomie den Anspruch, sie solle die Stammesgeschichte widerspiegeln, so ist der Stamm *Sarcomastigophora* ebenfalls obsolet.

Phylogenetisch gesehen ist «Amöbe» gar kein sinnvoller Begriff. Amöboide Zellen sind in der Evolutionsgeschichte der Eukaryoten mehrmals und unabhängig voneinander entstanden; das heisst sie sind polyphyletischen Ursprungs und stellen einen Fall von konvergenter Evolution dar. In der mittlerweile etablierten neuen Taxonomie³ der Eukaryoten (Adl et al. 2005) zählen wir etwa 15'000 Species von «Amöben» auf den verschiedensten Zweigen des Baums des Lebens (Abb. 4). Bei der grossen Gruppe der Amoebozoa begegnen wir der pathogenen *E. histolytica* wieder, neben freilebenden, dem Süsswassermikroskopiker gut vertrauten Arten wie *Amoeba proteus* oder *Chaos*. Ebenfalls zu den Amoebozoa werden die sogenannten Schleimpilze (*Mycetozoa*) wie *Dictyostelium* oder *Physarum* gezählt; von ihnen soll später noch die Rede sein. Ausser den Amoebozoa umfassen die Rhizaria die meisten Arten von Amöben. Sie lassen sich aber in der Regel nicht kultivieren und sind darum der biologischen Forschung nur schwer zugänglich. Die kaum untersuchte Familie der Vampiramöben (*Vampyrellidae*) zum Beispiel hat sich darauf spezialisiert Grünalgen oder Pilze anzugreifen, deren Zellwände ihre filösen Pseudopodien durchdringen können. Am besten dokumentiert durch rezente und fossile Funde sind diejenigen Rhizaria mit stabilen Stützskeletten oder Gehäusen (Abb. 5). Da sind die *Acantharea* mit ihrem perfekt geometrischen Skelett

³ Welche die geläufige, aber stammesgeschichtlich unsinnige Unterteilung der Eukaryoten in die Reiche «Tiere», «Pflanzen», «Pilze» und «Protisten» abgelöst hat.

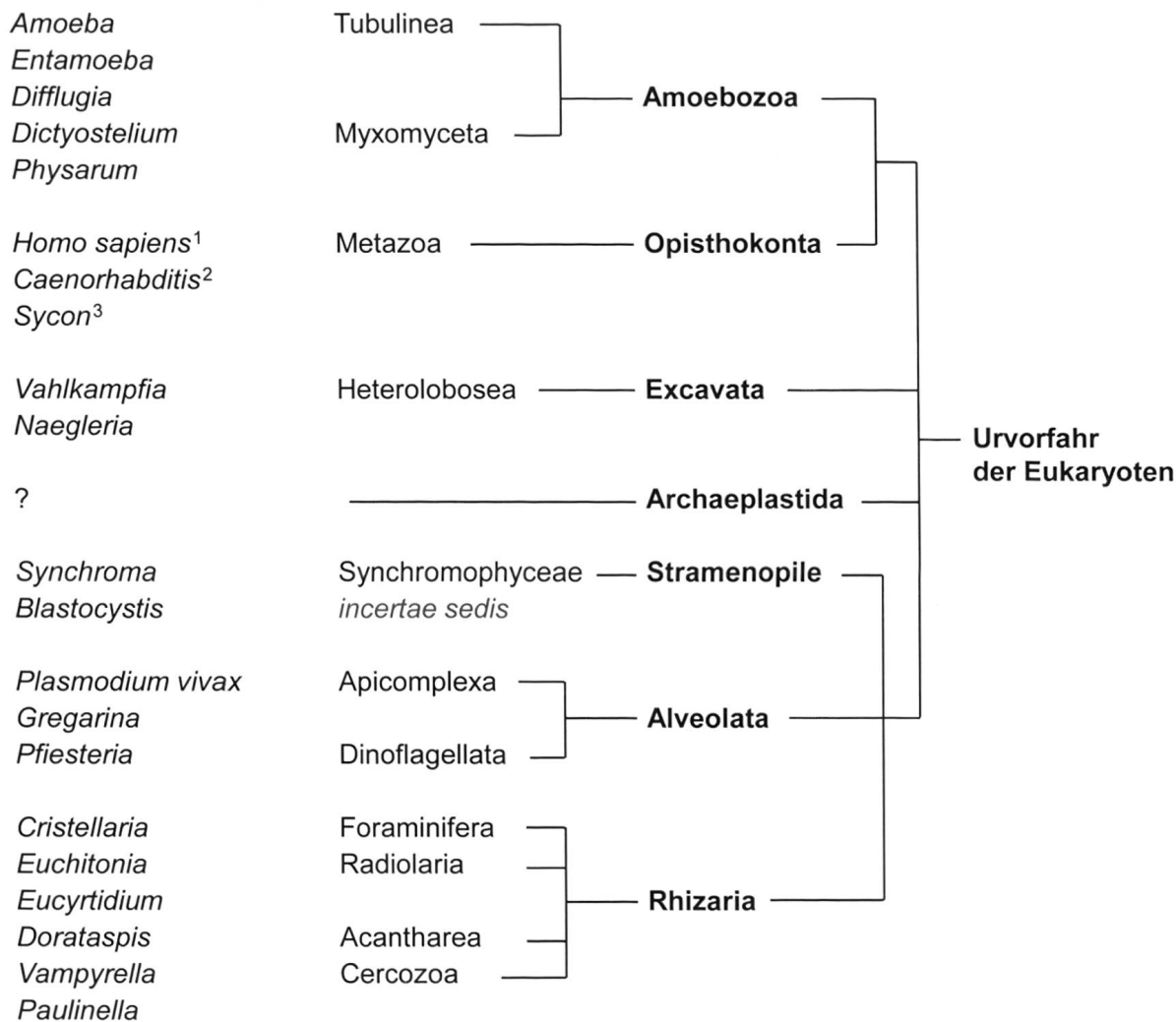


Abb. 4: Im Text besprochene amöboide Zellen und ihre phylogenetische Zugehörigkeit. Amöben finden sich in allen Hauptgruppen der Eukaryoten (fett gedruckt), mit der möglichen Ausnahme der Archaeplastida. ¹Phagocyten, ²Spermien, ³Eizellen.

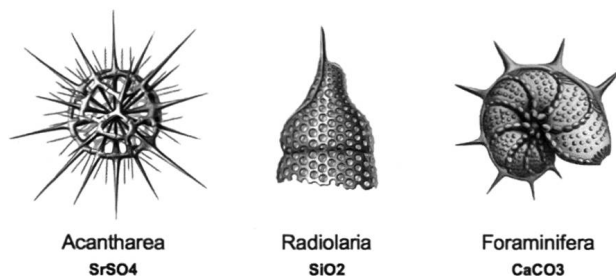


Abb. 5: Beispiele von Skeletten und Gehäusen der Rhizaria von verschiedener chemischer Zusammensetzung: *Dorataspis* (Acantharea), *Eucyrtidium* (Radiolaria) und *Cristellaria* (Foraminifera). Bilder von Ernst Haeckel («Die Radiolarien», 1862 und «Kunstformen der Natur», 1904).

von zwanzig Stacheln aus Strontiumsulfat, optimal über eine Kugeloberfläche verteilt. Oder die Radiolarien, deren aus Siliciumdioxid gebauten Skelette an Kunstfertigkeit kaum zu übertreffen sind. Und die Foraminiferen haben als Baumeister gekammerte Schutzgehäuse aus Kalk wie das Schneckenhaus lange vor den Mollusken erfunden (Abb. 5). Einer der wenigen Vertreter der Rhizaria, welcher sich im Labor züchten lässt, ist die grüne Amöbe *Paulinella chromatophora*. Sie ist photosynthetisch und somit sehr genügsam. An *Paulinella* wurde die Zellteilung studiert und gezeigt, dass eine Mutterzelle schon vor der Teilung ein leeres Gehäuse baut, welches dann von der Tochterzelle in Besitz genommen wird (Nomura et al. 2014).

Ausser bei den Amoebozoa und den Rhizaria finden wir Amöben auch bei den anderen Hauptgruppen der Eukaryoten (mit der möglichen Ausnahme der Archaeplastida; Abb. 4). Zu den Excavata gehören die Fliessamöben (*Vahlkampfia*) und die berühmte *Naegleria fowleri* (Abb. 3), eine in warmen Tümpeln vorkommende Amöbe. Wird sie beim Schwimmen über die Nase aufgenommen, kann sie dem Riechnerv entlang wandernd bis ins Gehirn vordringen und schwerwiegende cerebrale Infekte verursachen. Diese sind zwar äusserst selten, verlaufen aber meistens tödlich. *Blastocystis hominis* ist ebenfalls eine potentiell pathogene Amöbe. Sie lebt im Darm, ist zumeist asymptomatisch, kommt aber als Erregerin von Reizdarm in Frage. *Blastocystis* gehört zu den Stramenopiles, einer Schwestergruppe der Rhizaria (Abb. 4). *Pfiesteria piscicida*, benannt nach der Biologin Lois Ann Pfiester, ist ein rätselhafter mariner Dinoflagellat mit einer Vielzahl verschiedener Stadien, wovon mehrere amöboid sind. *Pfiesteria* ernährt sich räuberisch von Fischen, welche vermutlich durch ein Toxin erlegt werden, das bisher aber noch niemand identifizieren konnte. Blüten von *Pfiesteria* werden für das Massensterben von Fischen verantwortlich gemacht. Amöboide Stadien gibt es auch bei Vertretern der Apicomplexa und waren namensgebend für den Malariaerreger *Plasmodium vivax*, dessen Trophozoiten sich innerhalb der befallenen roten Blutkörperchen lebhaft amöboid bewegen. Schliesslich kommen amöboide Zellen sogar bei Tieren vor (Metazoa, zu den Opisthokonta gehörend; Abb. 4), zum Beispiel die Eizellen von Kalkschwämmen oder die Spermien des Fadenwurms *Caenorhabditis elegans*. Und beim Menschen? Auch wir besitzen amöboide Zellen! Die Phagocyten von Warmblütern, allen voran die Makrophagen, haben viel gemeinsam mit Amöben.

Eine verhängnisvolle Ähnlichkeit

Als 1976 in Philadelphia das Jahrestreffen der Amerikanischen Legion stattfand, ahnten die teilnehmenden Legionäre nicht, dass sie in die Geschichte eingehen würden als Namensgeber für ein mittlerweile gefürchtetes Bakterium: *Legionella pneumophila*, die Erregerin der so-

genannten Legionärskrankheit. Die Bakterien hatten die Klimaanlage des Hotels infiltriert⁴, wurden über die Luft inhaliert und führten bei 221 der etwa 2000 Teilnehmer zu Lungenentzündungen, wovon 34 tödlich verliefen. Legionellen befallen und vermehren sich intrazellulär in Makrophagen – ausgerechnet in den Zellen, die eigentlich für die Vernichtung von Bakterien und anderen Eindringlingen zuständig sind. Und die Legionellen stehen mit diesem «extremophilen» Verhalten nicht allein: verschiedene humanpathogene Mikroorganismen können im Innern von Makrophagen überleben und sich dort sogar vermehren. Der klinisch bedeutendste ist der Tuberkelbazillus *Mycobacterium tuberculosis*.

Amöbe und Makrophage, beide sind grosse Jäger. Sie verfolgen unterschiedliche Ziele auf gleichem Weg. Während sich die Amöbe von den erbeuteten Mikroorganismen ernährt, dient der Makrophage ihrer Zerstörung und anschliessenden Präsentation von Bruchstücken für die T-Zellen unseres Immunsystems. Amöbe und Makrophage bewegen sich zielgerichtet mittels Pseudopodien und benutzen diese auch zum Beutefang. Die Beute wird eingeschlossen und es bildet sich das Phagosom, welches dann zum Phagolysosom, der Verdauungsvakuole, reift. Dort herrscht – unserem Magen ähnlich – ein lebensfeindliches

⁴ In der Schweiz kam *Legionella* in die Medien, weil das Kühlwasser des AKW Leibstadt befallen war und die eingesetzten Desinfektionsmittel den Rhein belasteten.

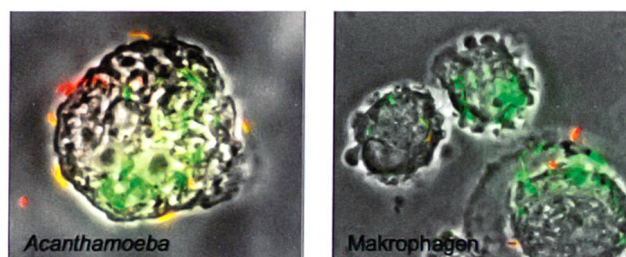


Abb. 6: Amöbe (*Acanthamoeba castellanii*, links) und Makrophagen (human, rechts) infiziert mit *Legionella pneumophila*. Die Legionellen sind genetisch modifiziert und produzieren das grün fluoreszierende Protein GFP. Extrazelluläre Bakterien sind mit einem Antikörper rot gegengefärbt. Die Bakterien messen ca. 0.5 x 2.0 µm.

Millieu, dominiert von saurem pH und lytischen Enzymen. Bakterien können dem sicheren Tod im Phagolysosom entgehen, indem sie entweder ins Cytoplasma der Wirtszelle ausbrechen oder, Signalübertragungswege des Makrophagen manipulierend, die Reifung des Phagosoms verhindern. Wo haben sie solche Tricks gelernt? Eine plausible Hypothese fusst auf der grossen ökologischen Bedeutung von Amöben als Bakterienfresser (Swanson & Hammer 2000). Sie besagt, dass freilebende Amöben einen derartigen Selektionsdruck auf (ebenfalls freilebende) Bakterien ausüben, dass manche Arten von Bakterien Evasionsstrategien entwickelt haben, die sie schliesslich sogar dazu befähigten, Amöben zu parasitieren. Diese Evolution vollzog sich unabhängig von unserem Immunsystem und wahrscheinlich bereits ehe es überhaupt Säugetiere gab. Solche Bakterien sind dann jedoch prädestiniert in Makrophagen zu überleben, sollten sie von ihnen gefressen werden. Somit wäre die konvergente Evolution von Amöbe und Makrophage bezüglich der Zerstörung von Bakterien ein für uns verhängnisvoller Zufall. In der Tat wurde gezeigt, dass eine Vielzahl von intra-amöboiden Mikroorganismen beim Menschen als Verursacher atypischer Lungenentzündungen in Frage kommt (Lamoth & Greub 2010).

Für die Forschung bedeutet die Ähnlichkeit zwischen Amöbe und Makrophage, dass sich diese als Modell für jene verwenden lassen, um Wirt-Parasit Beziehungen zu untersuchen (Abb. 6). Dafür bietet sich insbesondere *Dictyostelium discoideum* an, die Lieblingsamöbe der Molekularbiologen. *Dictyostelium* – wahlweise als sogenannter Schleimpilz oder als soziale Amöbe klassifiziert – lässt sich gut im Labor kultivieren und genetisch manipulieren, so dass sich die Bedeutung von Genprodukten der Wirtszelle auf das Überleben von pathogenen Bakterien messen lässt (was in Makrophagen kaum möglich wäre). Wegweisende Beiträge auf diesem Forschungsgebiet kommen aus der Schweiz, aus den Labors der Proff. Thierry Soldati an der Universität Genf (Barisch et al. 2015) und Hubert Hilbi an der Universität Zürich (Weber et al. 2014).

Soziales Verhalten und Intelligenz

Amöben vermehren sich zumeist asexuell durch Zweiteilung. Dabei kann es vorkommen, dass die zwei Tochterzellen Mühe bekunden, sich voneinander zu lösen. Sie bleiben über einen dünnen Membranstrang miteinander verbunden und bringen es nicht fertig, die Zellteilung zu vollziehen. Bei solchen Fällen haben Forscher vom Weizmann Institute eine interessante Beobachtung gemacht: Eine dritte Amöbe kann zu Hilfe «eilen», eine Geburtshelferin, welche geradewegs auf diesen Membranstrang zusteuert, ihn durchtrennt und die zwei Amöben aus ihrer misslichen Lage befreit (Biron et al. 2001). Die Hilfeleistung der Geburtshelferamöbe ist altruistischer Natur, sie selbst hat davon keinen Vorteil. Sie geschieht wahrscheinlich aufgrund positiver Chemotaxis auf einen noch nicht identifizierten Botenstoff.

Ein wichtiger Botenstoff von Amöben ist bekannt: das Molekül zyklisches Adenosinmonophosphat (cAMP). Es ist ein universelles Signalmolekül, von Bakterien bis zu Warmblütern dient es der zellulären Übermittlung von Information⁵. Die Bedeutung von cAMP für die interzelluläre Kommunikation wurde besonders gut bei *D. discoideum* untersucht. *Dictyostelium* ist ein Schleimpilz (*Myxomyceta*), gehört aber zu den Amoebozoa (Abb. 4). Die *Myxomyceta* wurden früher irrtümlicherweise zu den Pilzen gezählt, weil sie makroskopische Fruchtkörper bilden (Abb. 7). Hierbei spielt cAMP als Botenstoff eine zentrale Rolle. Bei widrigen Wachstumsbedingungen beginnen nämlich einzelne Amöben, cAMP auszuschcheiden, was andere Amöben anlockt und stimuliert, ihrerseits cAMP zu produzieren und abzugeben. Dieser selbstorganisierende Prozess führt zu spiralförmigen Wellen von cAMP, in deren Zentrum sich die Amöben zusammenrotten (Tomchik & Devreotes 1981). So bilden an die 100'000 Zellen ein Pseudoplasmodium von etwa 3 mm Länge, welches sich in schneckenartiger, positiv-photo-

⁵ Beim Menschen natürlich auch. Die pharmakologische Bedeutung ist durch die Wirkungsweise von Viagra belegt, welches die cAMP Konzentration erhöht.

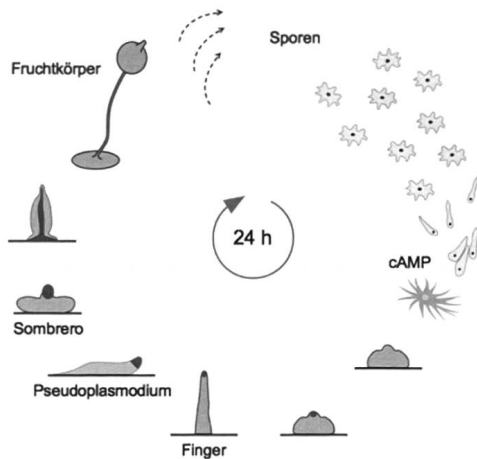


Abb. 7: Der asexuelle Zyklus von *Dictyostelium discoideum*. Bei schlechten Wachstumsbedingungen schliessen sich die Amöben zu einem Pseudoplasmodium zusammen und bilden schliesslich einen Fruchtkörper. Die Sporen werden mit dem Wind in neue Lebensräume getragen.

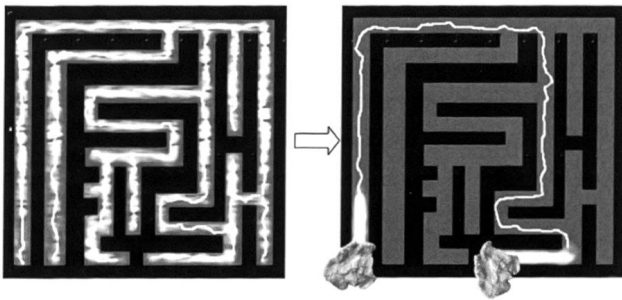


Abb. 8: *Physarum polycephalum* löst als Plasmodium ein Labyrinth: innerhalb von acht Stunden verbindet *Physarum* die zwei als Nahrungsquelle angebotenen Cornflakes über den kürzest möglichen Weg.

taktischer Fortbewegung ein geeignetes Plätzchen sucht, um den Fruchtkörper zu bilden. Bei *Dictyostelium* wird der Altruismus buchstäblich auf die Spitze getrieben. Die Zellen im Stamm des Fruchtkörpers opfern sich auf, damit sich jene im Fruchtkörper als Sporen verbreiten können (Abb. 7). Wer das Rennen macht und es in den Fruchtkörper schaffen wird, entscheidet sich schon in früheren Stadien (dunkelgraue Regionen in Abb. 7). Weil sich verschiedene Stämme in der Aggregationsphase mischen lassen (auch transgene, verschiedene Markerproteine produzierende Stämme), bietet *Dictyostelium* ein interessantes Modell, um interzellulären Wettbewerb und soziale Evolution zu studieren (Strassmann et al. 2000). Bemerkenswert ist ausserdem, dass es Stämme von *D. discoideum* gibt, die Bakte-

rien züchten, respektive Bakterien, die sich von *Dictyostelium* züchten lassen. Die Bakterien locken Amöben aktiv mit Folsäure an, werden dann von den Amöben in den Fruchtkörper mit eingebracht und, nach dem Auskeimen der Sporen, auf neuen Lebensräumen angesiedelt. Im Labor wurde gezeigt, dass *D. discoideum* «Farmer»-Stämme (im Gegensatz zu Nicht-Farmern) in der Lage sind, sterile Agarplatten zu besiedeln (Brock et al. 2011). Eine andere Form sozialen Verhaltens zeigt *Synchroa grande*, eine weitere rätselhafte Amöbe, die erst 2007 entdeckt wurde. *Synchroa* hat keine bekannten Verwandten und so wurde ihr eigens die Klasse *Synchromophyceae* innerhalb der Stramenopiles geschaffen (Abb. 4). Mehrere Individuen von *Synchroa* fangen und verdauen ihre Beute gemeinsam, nachdem sie durch Verschmelzen ihrer retikulösen Pseudopodien ein dichtes Netzwerk gebildet haben (ein Meroplasmodium). Diese Netzwerke sind kaum untersucht; es braucht aber nicht viel Fantasie, um sich vorzustellen, dass möglicherweise Information in Form von elektrischen Signalen den Pseudopodien entlang übermittelt werden könnte – und schon hätte man so etwas wie ein autonomes Nervensystem.

Gibt es intelligentes Verhalten bei Amöben, sind sie zum Beispiel fähig, eine Denksportaufgabe zu lösen? Aber sicher! Man muss es ihnen nur zutrauen und die Aufgabe in angemessener Form stellen. Als Erste bewerkstelligten dies japanische Forscher vom Riken Institut (Nakagaki et al. 2000) und zwar folgendermassen: Sie schnitten ein Labyrinth von 4 auf 4 cm aus Plastikfolie aus (Abb. 8, schwarz), legten es auf einen Nährboden von Agar (Abb. 8, grau) und besäten es mit *Physarum polycephalum* (Abb. 8, weiss). *Physarum* gehört wie *Dictyostelium* zu den fälschlicherweise als Schleimpilze bezeichneten sozialen Amöben. Im Gegensatz zu *Dictyostelium* bildet *Physarum* ein echtes Plasmodium, das heisst eine vielkernige Riesenzelle, welche auf Nahrungssuche geht wie der Blob im anfangs erwähnten Horrorfilm. Das Plasmodium überwuchs das gesamte Labyrinth (Abb. 8, links). Dann platzierten die Forscher am Eingang und am Ausgang des Labyrinths je ein Cornflake. Innerhalb der nächsten acht Stunden bildeten sich darauf alle in

einer Sackgasse mündenden Arme zurück, bis nur noch ein Strang übrig blieb: die Durchquerung des Labyrinths! Am erstaunlichsten beim Labyrinthexperiment ist noch nicht einmal, dass *Physarum* eine Lösung findet. Die Amöbe findet sogar immer die beste Lösung, sprich bei mehreren möglichen Wegen den kürzesten, der die zwei Nahrungsquellen miteinander verbindet (Abb. 8, rechts). Dieses intelligente Verhalten findet mögliche Anwendungen im Planungswesen. *Physarum* vermag nämlich auch komplexe Probleme zu lösen, wie zum Beispiel das Berechnen des optimalen Netzwerks, das eine gegebene Menge von Knotenpunkten miteinander verbindet (sofern diese durch Cornflakes oder andere süsse Nahrungsquellen repräsentiert werden). So wurde *Physarum* probenhalber eingesetzt, um ein Verbindungsnetz für Tokyo und seine 35 umliegenden Städte zu bilden (Tero et al. 2010). Interessanterweise glichen die von der Amöbe vorgeschlagenen Varianten nicht so sehr der theoretischen, längenoptimierten Lösung als vielmehr dem tatsächlichen, von den Ingenieuren erarbeiteten Eisenbahnnetz und sie unter-

schieden sich von dieser nur unwesentlich bezüglich der totalen Streckenlänge, der Transporteffizienz zwischen zwei beliebigen Stationen und der Robustheit des Netzwerks gegenüber Streckenunterbrüchen. Eine fantastische Leistung der Amöbe!

Jetzt mögen Sie vielleicht einwenden, dass dieses scheinbar intelligente Verhalten auf Selbstorganisation zurückzuführen sei und letztlich doch nur eine Folge von biochemischen Prozessen der Signalübertragung ist. Darauf würde ich antworten: Ja, genau gleich wie bei den Nervenzellen unseres Gehirns! Und so hoffe ich, dass Sie Amöben künftig mit anderen Augen sehen werden und durch diesen Artikel auch mit der nötigen Munition versehen wurden, um die Ehre der Amöben zu verteidigen, sollte jemand es wagen, sie primitiv zu nennen.

Dank

Ein herzlicher Dank geht an Prof. Hubert Hilbi für die Fotos in Abbildung 6 und für das kritische Durchlesen des Manuskripts.

Literatur

- Adl S. M. et al. (2005): The new higher level classification of eukaryotes with emphasis on the taxonomy of protists. *J Eukaryot Microbiol* 52: 399–451.
- Barisch C., A. T. Lopez-Jimenez & T. Soldati (2015): Live imaging of *Mycobacterium marinum* infection in *Dictyostelium discoideum*. *Methods Mol Biol* 1285: 369–85.
- Biron D., P. Libros, D. Sagi, D. Mirelman & E. Moses (2001): Asexual reproduction: «midwives» assist dividing amoebae. *Nature* 410: 430.
- Brock D. A., T. E. Douglas, D. C. Queller & J. E. Strassmann (2011): Primitive agriculture in a social amoeba. *Nature* 469: 393–6.
- Cavalier-Smith T. (1987): Eukaryotes with no mitochondria. *Nature* 326: 332–3.
- Clark C.G. & A. J. Roger (1995): Direct evidence for secondary loss of mitochondria in *Entamoeba histolytica*. *Proc Natl Acad Sci U S A* 92: 6518–21.
- Lamoth F. & G. Greub (2010): Amoebal pathogens as emerging causal agents of pneumonia. *FEMS Microbiol Rev* 34: 260–80.
- Levine N. D., J. O. Corliss, F. E. Cox, G. Deroux, J. Grain, B. M. Honigberg, G. F. Leedale et al. (1980): A newly revised classification of the protozoa. *J Protozool* 27: 37–58.
- Loftus B. et al. (2005): The genome of the protist parasite *Entamoeba histolytica*. *Nature* 433: 865–8.
- Nakagaki T., H. Yamada & A. Toth (2000): Maze-solving by an amoeboid organism. *Nature* 407: 470.
- Nomura M., T. Nakayama & K. Ishida (2014): Detailed process of shell construction in the photosynthetic testate amoeba *Paulinella chromatophora*. *J Eukaryot Microbiol* 61: 317–21.
- Porter S. M. & A. H. Knoll (2000): Testate amoebae in the Neoproterozoic Era: evidence from vase-shaped microfossils in the Chuar Group, Grand Canyon. *Paleobiology* 26: 360–85.
- Schatz G. (2011): *Feuersucher: Die Jagd nach dem Geheimnis der Lebensenergie*. Weinheim DE, Wiley-VCH Verlag.
- Strassmann J. E., Zhu Y, Queller D C (2000): Altruism and social cheating in the social amoeba *Dictyostelium discoideum*. *Nature* 408: 965–7.
- Swanson M. S. & B. K. Hammer (2000): *Legionella pneumophila* pathogenesis: a fateful journey from amoebae to macrophages. *Annu Rev Microbiol* 54: 567–613.
- Tero A., S. Takagi, T. Saigusa, K. Ito, D. P. Bebber, M. D. Fricker, K. Yumiki, R. Kobayashi, & T. Nakagaki (2010): Rules for biologically inspired adaptive network design. *Science* 327: 439–42.
- Tomchik K. J. & P. N. Devreotes (1981): Adenosine 3',5'-monophosphate waves in *Dictyostelium discoideum*: a demonstration by isotope dilution-fluorography. *Science* 212: 443–46.
- Weber S., M. Wagner & H. Hilbi (2014): Live-cell imaging of phosphoinositide dynamics and membrane architecture during *Legionella* infection. *MBio* 5: e00839–13.

Prof. Pascal Mäser
 Swiss Tropical and Health Institute
 Socinstrasse 57
 4051 Basel
pascal.maeser@unibas.ch

Bildnachweis

- Abb. 1: Scan von P. Mäser, Swiss TPH.
- Abb. 2: ClipArt ETC, Florida Center for Instructional Technology, University of South Florida (etc.usf.edu/clipart/).
- Abb. 3: DPDx - Laboratory Identification of Parasitic Diseases of Public Health Concern, Center of Disease Control, Atlanta USA (www.cdc.gov/dpdx/); modifiziert durch P. Mäser
- Abb. 4: Scans von Kurt Stüber; modifiziert durch P. Mäser
<http://caliban.mpiz-koeln.mpg.de/haeckel/radiolarien/>
<http://caliban.mpiz-koeln.mpg.de/haeckel/kunstformen/>
- Abb. 6: Fotos von Hubert Hilbi, Universität Zürich
- Abb. 7: Wikimedia Commons; modifiziert durch P. Mäser
- Abb. 8: Wikimedia Commons; modifiziert durch P. Mäser

