



Abb. 3 Skulpturierte Form (S-Form). Visualisierung der Strömung, von rechts nach links: Hufeisenwirbel (horseshoe vortices). „Die skulpturierten Felsen von Cantley“, Quebec. Video-Screenshot (© Geodoxa).

tung an. Es handelt sich also um einen Analogieschluss.

Diskussion. Üblicherweise werden solche Oberflächen wie am Mätkenberg als Gletscherschliff angesprochen bzw. interpretiert. Dass hier eine Wasser- anstelle einer Gletschererosion vorliegen könnte, ist eine vorläufige Interpretation. Denn es bedarf weiterer Beobachtungen aus anderen Perspektiven und unmittelbar am Gesteinskörper selbst. Insbesondere gilt es Erosionsmarken im Millimeter- und Dezimeterbereich zu überprüfen, ob beispielsweise Gletscherschrammen oder Kavitationsmarken² vorliegen.

Relevanz. Erosion durch Eis oder durch Wasser? Das Verständnis für die Bildung von subglazialen Oberflächenformen hat große Relevanz. Denn unterschiedliche Prozesse führen zu unterschiedlichen Interpretationen. So werden zahlreiche groß- und kleinskalige Oberflächenformen in vielen Teilen Kanadas als Produkte subglazialer, hochenergetischer Schmelzwasserströme im Kontext von Megaflut-Ereignissen gedeutet und sind schließlich Indizien für einen abrupten Zusammenbruch des laurentischen Eisschildes am Ende der Eiszeit (siehe dieses Journal, Ausgabe April 2021; KOTULLA 2021, weitere Referenzen dort).

[KOTULLA M (2021) Eiszeit: Indizien für abrupten Zusammenbruch des laurentischen Eisschildes. *Studium Integrale Journal* 28, 53–55.¹ unter der Eismasse/dem Gletscher gebildet/befindlich; ² spindelförmige Riefen im Millimeter- bis Zentimeterbereich] M. Kotulla

■ Erinnerungen eines Einzelzellers – Gedächtnis ohne Gehirn

Physarum polycephalum ist ein azellulärer Schleimpilz, ein sogenannter Myxogastrid, der eng mit den zellulären Schleimpilzen (Dictyosteliden) einschließlich des bekannten *Dictyostelium discoideum* verwandt ist. *Physarum* wächst zunächst als einzellige Amöbe, wobei die Amöben verschiedener Individuen später verschmelzen, sodass der Organismus seine zelluläre Struktur verliert. Während der Organismus weiter wächst, teilen sich die Zellkerne ohne Zellteilung. Der dabei entstehende Kernsack wird als Coenozyt oder Plasmodium bezeichnet (ALIM 2013). *Physarum* kann also als ein

einzelliger Organismus mit vielen Kernen betrachtet werden, der aufgrund seiner äußeren Glykoprotein-Gel-Schicht ein schleimiges Aussehen hat – daher auch der Name Schleimpilz. Sein Körper ist eine riesige Einzelzelle, die aus miteinander verbundenen Röhren besteht, welche ein komplexes Netzwerk bilden (Abb. 1). Diese Einzeller erreichen enorme Größen und nehmen häufig die Form amöbenartiger Wesen von mehreren Zentimetern Länge an. Aufgrund seiner immensen Ausdehnungsfähigkeit wird *Physarum* im Guinness-Buch der Rekorde als die größte Zelle der Erde geführt.

Die Fähigkeit, Informationen zu speichern und wiederzugewinnen, um nach Nahrung zu suchen oder schädliche Umgebungen zu meiden, wurde bisher nur Organismen mit einem Nervensystem zugeschrieben. *Physarum* hat ein solches System jedoch nicht. Forscher des Max-Planck-Instituts für Dynamik und Selbstorganisation (MPI-DS) und der Technischen Universität München (TUM) haben nun herausgefunden, wie dieser Organismus dennoch Informationen über seine Umgebung abrufen und speichert (KRAMAR & ALIM 2021). *Physarum* wird manchmal als „intelligent“ bezeichnet, denn seine Verhaltensweisen sind ziemlich komplex und der Schleimpilz kann anspruchsvolle Probleme lösen – ohne Gehirn. So



Abb. 1 Schleimpilz *Physarum polycephalum*. (© TommyIX, iStock)

kann er beispielsweise den kürzesten Weg durch ein Labyrinth finden. Sein Röhrennetz kann verschiedene Ressourcen miteinander verbinden und die Biomasse proportional verteilen, um eine optimale Ernährung zu erreichen. Seine Netzwerke transportieren Substrate effizient, sind aber auch ausreichend redundant, um gegen die Zerstörung von Röhren gewappnet zu sein.

Wie könnte das Gedächtnis in Organismen funktionieren, die keinen mehrzelligen Körper und kein Nervensystem besitzen? Es stellte sich heraus, dass die Erinnerung an die Vergangenheit in der Netzwerkarchitektur der Röhren gespeichert wird. Dies wurde deutlich, als die Forscher den Wanderungs- und Fütterungsprozess des Organismus verfolgten. Lange nach der Fütterung beobachteten sie eine deutliche Prägung des Musters der dickeren und dünneren Röhren des Netzwerks durch die jeweilige Nahrungsquelle. Karen ALIM, die leitende Forscherin und Professorin für Theorie biologischer Netzwerke an der Technischen Universität München, kommentiert dies in *Science Daily*: „Angesichts der hochdynamischen Reorganisation des Netzwerks von *P. polycephalum* brachte die Beständigkeit der Prägung die Idee hervor, dass die Netzwerkarchitektur selbst als Gedächtnis der Vergangenheit dienen könnte.“ Zunächst war es jedoch erforderlich, den Mechanismus aufzuklären, der hinter der Bildung der Prägung steht.

Mikroskopische Beobachtungen und mathematische Modellierung zeigten, dass diese Röhren als Reaktion auf eine Nährstoffquelle im Durchmesser wachsen oder schrumpfen, wodurch die Position des Nährstoffs in der Hierarchie der Röhrendurchmesser gespeichert wird. Der Nährstoff selbst löst die lokale Freisetzung eines Weichmachers aus, der durch die zellulären Ströme innerhalb des Röhrennetzes transportiert wird. Röhren, die viel Weichmacher erhalten, vergrößern ihren Durchmesser auf Kosten der anderen Röhren, die schrumpfen. Dadurch werden die Kapazitäten der Röhren für den strömungs-basierten Transport permanent in

Richtung des Nährstoffstandortes erhöht. Dies lenkt auch zukünftige Entscheidungen und Wanderungen der Röhren um. Der Nährstoffstandort wird also in der Hierarchie der Röhrendurchmesser des Netzwerks gespeichert und von dort abgerufen. Mirna KRAMAR, Mitautorin der Studie, kommentiert: „Vergangene Fütterungsereignisse sind in der Hierarchie der Röhrendurchmesser eingebettet, insbesondere in der Anordnung von dicken und dünnen Röhren im Netzwerk“ (TUM 2021).

Obwohl der durch den Nährstoff ausgelöste Weichmacher noch unbekannt ist, könnte das Gedächtnis durch die Verwendung künstlicher, die Röhren aufweichender Verbindungen nachgeahmt werden. Diese Erkenntnisse erklären, wie netzwerkbildende Organismen wie Schleimpilze und Pilze in komplexen Umgebungen gedeihen. Die Autoren schreiben, dass dieser Mechanismus von Strömungsnetzwerken einer Art assoziativem Gedächtnis ähnelt, was höchstwahrscheinlich auch für eine Vielzahl von noch nicht untersuchten Strömungsnetzwerken in anderen Organismen von Bedeutung ist. Als Hoffnung für künftige Entwicklungen führen sie an, dass ihre Erkenntnisse bioinspirierte Designanwendungen ermöglichen könnten, zum Beispiel bei Robotern mit weichen Körpern, die durch komplexe Umgebungen navigieren müssen. Sollte es „eines Tages“ wirklich navigierende Roboter mit Gedächtnis geben, werden sie sicherlich von intelligenten Menschen entworfen worden sein. Ist es da noch angemessen zu glauben, dass *Physarum* durch einen blinden evolutionären Prozess entstanden ist?

[ALIM K, ANDREW N & PRINGLE A (2013) *Physarum*. Curr. Biol. 23, PR1082-R1083. [https://www.cell.com/current-biology/comments/S0960-9822\(13\)01187-1](https://www.cell.com/current-biology/comments/S0960-9822(13)01187-1) • KRAMAR M & ALIM K (2021) Encoding memory in tube diameter hierarchy of living flow network. Proc. Natl. Acad. Sci. 118, e2007815118 DOI: 10.1073/pnas.2007815118 • TUM, Technical University of Munich (2021) A memory without a brain: How a single cell slime mold makes smart decisions without a central nervous system. ScienceDaily 23 February 2021. <https://www.sciencedaily.com/releases/2021/02/210223121643.htm>] P. Borger

■ Es gibt nichts Besseres als die DNA, um Information zu speichern

Heutzutage werden Daten fast ausschließlich digital und elektronisch gespeichert – auf der Festplatte eines Computers, auf einer CD oder auf einem USB-Stick. Die Speicherung elektronischer Daten überdauert aber nicht ewig. Ganz im Gegenteil: Nach fünfzig Jahren werden die meisten elektronischen Daten fast unlesbar. Außerdem veralten viele Speichermethoden in kürzester Zeit und die gespeicherten Daten können nicht mehr gelesen werden. Denken Sie an eine Floppy-Diskette oder eine Zip-Diskette. Sie sind heutzutage nutzlos, da es die passenden Lesegeräte nicht mehr gibt.

Vor einigen Jahren haben Wissenschaftler eine Methode entwickelt, um Information über einen langen Zeitraum zu speichern: synthetische DNA. Die DNA ist der kompakteste bekannte Informationsträger. Sie speichert Information effizienter als alles, was der Mensch bisher geschaffen hat. Die DNA benötigt keine Festplatten oder anderweitige elektronische Datenträger, die anfällig für mechanische Störungen sind. Darüber hinaus sind die vier Buchstaben der DNA, die einen Code bilden, ideal geeignet, um jede menschliche Sprache darzustellen. Die vier Buchstaben der DNA (A, C, G und T) lassen sich genauso gut digital schreiben wie 00, 01, 10 und 11. Ein Memorystick mit DNA als Speichermedium könnte dann etwa 100 Millionen Mal mehr Information enthalten als die üblichen elektronischen Speichersticks. Es gibt jedoch ein Problem: DNA ist fehleranfällig und wenn die DNA sich nicht in einer lebendigen Zelle befindet, werden die Fehler nicht repariert.

Die DNA ist ein hochkomplexes Molekül und ihre vier Buchstaben sind anfällig für chemische Veränderungen – vor allem durch Oxidation, wodurch die abgespeicherte Information verloren geht. Dieses Problem kann dadurch gelöst werden, dass die DNA luftdicht in winzige Quarzglasperlen verpackt und bei 18°C gelagert wird (GRASS