

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?

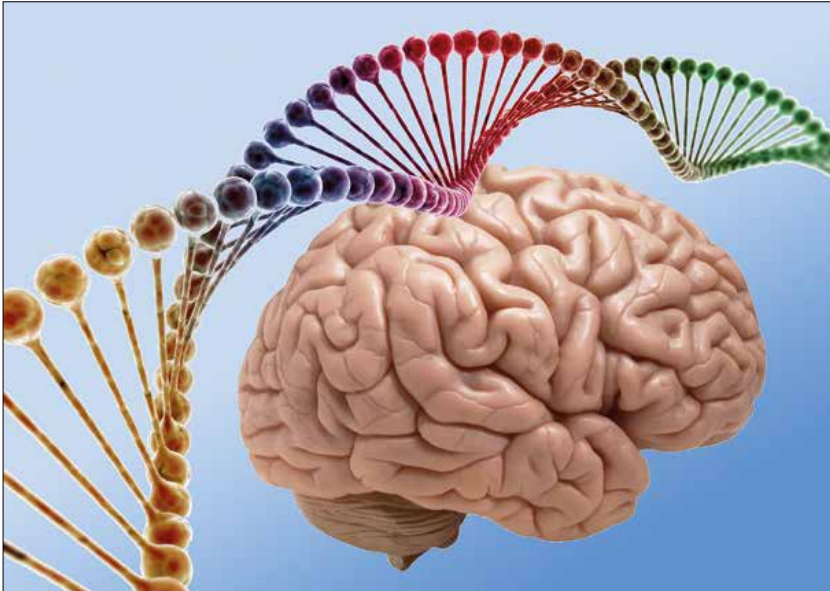
[ALIM K, ANDREW N & PRINGLE A (2013) *Physarum*. Curr. Biol. 23, PR1082-R1083. [https://www.cell.com/current-biology/comments/S0960-9822\(13\)01187-1](https://www.cell.com/current-biology/comments/S0960-9822(13)01187-1) • KRAMAR M & ALIM K (2021) Encoding memory in tube diameter hierarchy of living flow 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 kompakte 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



2015). Um die digitale Information wiederherzustellen, müssen die Perlen nur mit Flusssäure (HF) behandelt werden, einer mäßig starken Säure, die selektiv das Quarzglas auflöst. Da die DNA von der Flusssäure unbeschadet bleibt, kann ihr Informationsgehalt dann wieder in digitale Information umgewandelt werden, wenn man die richtige Apparatur hat, um die DNA zu isolieren und zu entschlüsseln. Mit dieser Methode könnte man die DNA für etwa eine Million Jahre und die synthetische Information stabil erhalten. Sie ist jedoch aufwändig und zeitraubend. Eine Lagerung bei Raumtemperatur wäre vorzuziehen, würde aber (wie oben beschrieben) rasch zu einer abnehmenden Brauchbarkeit des Informationsmediums führen.

Die meisten Schäden in der DNA sind außerdem sehr schwer zu erkennen. Wenn man nicht weiß, welche Information in der DNA enthalten ist, weiß man auch nicht, welche Fehler es gibt. Im Gegensatz zu Fehlern in Computercodes, die sich in der Regel als leere Stellen in der codierten Nachricht zeigen und

leicht zu erkennen sind, werden Fehler in DNA-Sequenzen nicht angezeigt. Das Problem besteht darin, dass sich die gesamte Sequenz verschiebt, wenn etwas in der DNA gelöscht oder hinzugefügt wird, ohne dass es leere Stellen gibt, die jemanden alarmieren würden. In bisherigen Experimenten wurde dieses Problem durch Vervielfältigung der Nachricht in mehreren DNA-Kopien gelöst, d. h. die Information wurde einfach 10 oder 15 Mal wiederholt. Wenn später die Information abgelesen wurde, wurden die verschiedenen Kopien verglichen, um Einfügungen oder Löschungen zu erkennen und die ursprüngliche Nachricht wiederherzustellen.

Nun hat eine Gruppe von Bioinformatikern der Universität von Texas (Austin, USA) dieses Problem offenbar gelöst. Die Forscher entwickelten einen Fehlerkorrekturcode, den sie HEDGES (Hash Encoded, Decoded by Greedy Exhaustive Search) nannten, der alle drei grundlegenden Arten von DNA-Fehlern repariert: Einfügungen, Löschungen und Substitutionen. Der entschei-

dende Durchbruch ist ein Kodierungsalgorithmus, der es ermöglicht, die Information auch dann genau abzurufen, wenn die DNA-Stränge während der Lagerung teilweise beschädigt werden. Dazu haben die Forscher die Information wie ein Gitter aufgebaut, sodass jede Information andere Teile der Information absichert. Auf diese Weise muss sie nur einmal gelesen werden und man braucht also nur einen DNA-Strang. Um ihre Methode zu demonstrieren, setzten die Forscher eine DNA-Sequenz, die die kodierte Information des berühmten Buches „Der Zauberer von Oz“ enthielt, hohen Temperaturen und extremer Feuchtigkeit aus. Obwohl die DNA-Stränge durch diese ungünstigen Bedingungen beschädigt wurden, konnte die komplette Information erfolgreich entschlüsselt werden. Man konnte beschädigte DNA, die bis zu 10 % Fehler enthielt, fehlerfrei wiederherstellen (Press et al. 2020).

Ist es nicht ironisch, dass ein vom Menschen geschaffener Code zur Wiederherstellung der in der DNA gespeicherten Information als Glanzleistung menschlicher Intelligenz angesehen wird, während entsprechende Vorgänge in der Zelle zur Reparatur der DNA selbst, dem unübertroffenen Informationsspeicher, nicht als Leistung einer höheren Intelligenz erkannt werden?

[GRASS RN, HECKEL R, PUDDU M, PAUNESCU D & STARK WJ (2015) Robust Chemical Preservation of Digital Information on DNA in Silica with Error-Correcting Codes. *Angewandte Chemie (international edition)*, 04 February 2015. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/anie.201411378> • PRESS WH, HAWKINS JA, JONES JR SK, SCHAUB JM & FINKELSTEIN JJ (2020) HEDGES error-correcting code for DNA storage corrects indels and allows sequence constraints. *PNAS* 117, 18489–18496. <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2004821117>] P. Borger