

Befunde, wonach es mindestens eine schubartige Vermischungsphase zwischen modernen, nicht-afrikanischen Menschen und Neandertalern gab. Außerdem identifizierten sie mehrere lange und stark divergierende DNA-Sequenzen, die zwar für Neandertaler spezifisch schienen, jedoch auch in einigen modernen menschlichen Populationen gefunden wurden. Demnach ist ein Großteil der heutigen genetischen Variation innerhalb des Menschen auf ILS zurückzuführen. Darüber hinaus nehmen die Autoren der Studie an, dass moderne Menschen mit Denisovaner-Allelen das Ergebnis mehrerer Introgressionsereignisse aus verschiedenen Ursprungspopulationen sein müssen. In der Genetik bezeichnet man mit Introgression den Transfer von genetischem Material von einer Art in den Genpool einer anderen durch die wiederholte Rückkreuzung eines Hybriden (hier: zwischen zwei Unterarten des Menschen) mit einer seiner Elternarten. Die Introgression ist ein zeitaufwendiger Prozess; selbst wenn sie künstlich herbeigeführt wird, kann es viele Hybridgenerationen dauern, bis eine signifikante Rückkreuzung stattfindet.

Dass sich die drei Menschenpopulationen miteinander vermischt haben, ist heutzutage allgemein anerkannt. Aber die Bedeutung dieser Vermischungen wurde möglicherweise unterschätzt. Die Forscher fanden heraus, dass nur 1,5 % des menschlichen Genoms (also seiner Allele; s. o.) sowohl einzigartig sind als auch von allen heute lebenden Menschen geteilt werden. Weitere 7 % des gesamten menschlichen Genoms (von allen Menschenformen) sind enger mit Genomen moderner menschlicher Populationen verwandt als mit denen der alten Neandertaler oder Denisovaner. Diese 1,5 % bis 7 % ausschließlich menschlicher DNA beziehen sich auf menschenpezifische Veränderungen der Sequenzen, die bei keiner anderen menschlichen Form vorkommen und nur bei *Homo sapiens* zu finden sind. Diese Daten müssen jedoch sorgfältig interpretiert werden. Bedeuten sie, dass

moderne Menschen alle bis zu 98,5 % Neandertaler sind? Nein, sie bedeuten eher, dass 98,5 % der Allele, der man im Neandertaler-Erbgut vorfindet, irgendwo in der gesamten Population der modernen Menschen ebenfalls vorkommen. Außerdem wurden dabei diejenigen Stellen nicht berücksichtigt, an denen Denisovaner und Neandertaler durch Mutationen DNA-Sequenzen hinzugewonnen oder verloren haben (sog. Indel-Mutationen). Es ist bekannt, dass beim Vergleich moderner menschlicher Populationen ein genetischer Unterschied von bis zu 12 % aufgrund solcher Zugewinne und Verluste festgestellt werden kann.

Diese neuen Studien zeigen, dass sich Neandertaler und Denisovaner gar nicht so sehr von uns unterscheiden und dass die gegenseitige Vermischung eine viel größere Rolle spielte als bisher angenommen. All dies steht in vollem Einklang mit der Auffassung, dass alle Menschenformen von einem einzigen Paar erschaffener Menschen abstammen, wie es die Bibel berichtet. Die Autoren selbst hängen immer noch der Idee an, dass der Neandertaler ein niedriger entwickelter Hominide sei: Sie diskutieren einige der einzigartigen genetischen Unterschiede in Bezug auf die Gehirnentwicklung (was anscheinend den modernen Menschen dem Neandertaler überlegen macht, obwohl es nicht den geringsten Beleg für diese Deutung gibt). Die Alternative ist, dass die einzigartigen Allele lediglich auf nicht zufällige Mutationen zurückzuführen sind, die in mehreren modernen menschlichen Populationen aufgetreten sind, aber keine Bedeutung für die Biologie oder Selektion haben (BORGER 2020).

[SÁNCHEZ-QUINTO F et al. (2012) North African Populations Carry the Signature of Admixture with Neanderthals. PLoS ONE 7(10): e47765, doi:10.1371/journal.pone.0047765 • SCHAEFER NK et al. (2021) An ancestral recombination graph of human, Neanderthal, and Denisovan genomes Science Advances 7(29): eabco776, doi: 10.1126/sciadv.abco776 • BORGER P (2019) Artübergreifende wiederkehrende Mutationen. Oder: Die Illusion der Verwandtschaft. Stud. Integr. J. 26, 77–85.] P. Borger

■ 14 „computergesteuerte“ Glieder beim Wimpertierchen

Wimpertierchen sind einzellige Eukaryoten; das sind – anders als Bakterien – Lebewesen mit einem Zellkern und mit Zellorganellen wie Mitochondrien, Golgi-Apparat und Ribosomen. Diese Zellorganellen sind komplexe biologische Gebilde, die hochspezialisierte biochemische Aufgaben übernehmen. Wimpertierchen gedeihen in Meeres- und Süßwasserumgebungen und sind in Boden- und Moosproben unter dem Lichtmikroskop relativ leicht zu beobachten. Die meisten Mitglieder der Gattung sind frei lebend, aber einige Arten leben als Kommensalen im Verdauungstrakt von Seeigeln, das heißt sie leben von den Ressourcen des Wirtes, ohne ihn dabei zu schädigen.

Es ist faszinierend, diese Tierchen unter dem Mikroskop zu beobachten (Video dazu unter <https://www.youtube.com/watch?v=CZA-oJzlkzZ4>). Sie haben 14 beinartige Strukturen, die so genannten Cirren, mit denen sie sich geschickt in der Umgebung bewegen. So können die Einzeller bemerkenswert ausgeklügelte, tierähnliche Verhaltensweisen an den Tag legen, um biologische Funktionen auszuführen. Sie suchen nach Nahrung oder nach Partnern und „rennen davon“, um Fressfeinden zu entkommen. Wie machen sie das? Sie müssen über eine Art Computersystem verfügen, um gerichtete und sinnvolle Bewegungen zu machen.

In einer neuen Studie wurde diese Steuerung beim Wimpertierchen *Euplotes eurystomus* untersucht (LARSON 2021). Diese Studie von Ben LARSON und Mitarbeitern von der Universität von Kalifornien in San Francisco, USA, hat in der Tat ergeben, dass die Mikrobe eine Art eingebauten mechanischen Computer besitzt, der die Beine in einer Weise bewegt, die typisch für so genannte „endliche Zustandsmaschinen“ ist. Darunter versteht man einen Automaten, der nur eine begrenzte Menge an Zuständen annehmen kann. Ein Beispiel für einen solchen Automaten ist eine elektrische Tür, die



Abb. 1 Lichtmikroskopische Aufnahme des Wimpertierchens *Euplotes* sp., die die Nahrungsvakuole mit rot gefärbten Hefezellen zeigt, mit denen sie gefüttert wurden, um den Prozess der Nahrungsaufnahme zu veranschaulichen. Vergrößerung: 500-fach. (Science Photo Library / GUENTHER, Gerd)

nur zwei Zustände annehmen kann: offen oder geschlossen. Alle anderen Zustände sind Übergangszustände zwischen offen und geschlossen. Damit die automatische elektrische Tür funktioniert, müssen zwei Zustände vorgegeben werden (offen und geschlossen). Die Autoren der Arbeit entdeckten, dass das bei der Mikrobe beobachtete Laufmuster einer Reihe vorhersehbarer oder festgelegter Ordnungen folgt. Dies ist mit dem Verhalten einer automatischen Tür vergleichbar, jedoch mit weitaus mehr Zustandsmöglichkeiten. Elektrische Türen benötigen elektrische Schaltkreise und Rechenleistung (Computer), damit sie richtig funktionieren. Heutzutage sind sie mit Mikroprozessoren ausgestattet, um dies zu tun. Wie schaffen das winzig kleinen Mikroben?

Die Autoren zeigten mit Hilfe von Zeitraffermikroskopie und quantitativen Analysen, dass die Fortbewegung des Wimpertierchens hochgradig regulierte Übergänge zwischen einer bestimmten Reihe an Gangzuständen beinhaltet. Die Menge der beobachteten Übergänge zerfällt in eine kleine Gruppe von zeitlich unumkehrbaren Übergängen mit hoher Wahrscheinlichkeit, die einen Zyklus bilden, und eine große Gruppe von synchronisierten Übergängen mit geringer Wahrscheinlichkeit, wodurch Stereotypen in

den sequenziellen Mustern der Zustandsübergänge sichtbar werden. Weitere Analysen ergaben, dass *Euplotes* während der Fortbewegung ein gewisses „Gedächtnis“ für die vorherige Abfolge der Bewegungen beibehält (LARSON 2021).

Zusammengefasst deuten diese Befunde auf einen endlichen Zustandsmaschinenähnlichen Prozess hin – vergleichbar einem mechanischen Computer. Die Cirren sind verbunden durch Mikrotubuli-Bündel, und die Dynamik der Cirren, die an verschiedenen Zustandsübergängen beteiligt sind, hängt mit der Struktur und Stärke (dick oder dünn) des Mikrotubuli-Bündelsystems zusammen. Das Fasersystem der Mikrotubuli bildet ein zusammenhängendes Netz zwischen allen Cirren, wobei Fasern, welche mit der Basis jeder Cirre verbunden sind, das Fasersystem von mindestens einer anderen Cirre kreuzen. Der Informationsfluss wurde deutlich, wenn die Faserverbindungen jeweils nach ihrer Art gruppiert wurden (d. h. dicke zu dicke Faser, dicke zu dünne Faser oder dünne zu dünne Faser). Bei dieser Gruppierung haben Cirren, die nur mit dicken oder nur mit dünnen Fasern verbunden sind, einen höheren gegenseitigen Informationsaustausch als solche ohne Verbindungen. Interessanterweise haben Cirren, die nahe beieinander

liegen und durch Fasern mit ähnlichen Regionen des Zellkortex verbunden sind, den höchsten gegenseitigen Informationsaustausch (Verbindungen). (Der Zellkortex ist eine Zytoplasmaschicht, die an der Innenseite der Zellmembran liegt und sehr reich ist an stabilisierenden Zytoskelettelementen.) Diese Struktur deutet darauf hin, dass die Fasern wie ein Computer für den Gang funktionieren könnten. Störexperimente zeigten tatsächlich, dass die Fasern die Gangkoordination vermitteln, was eine mechanische Grundlage der Gangsteuerung nahelegt. Anders gesagt: Die Wimpertierchen sind Mikromaschinen vergleichbar, deren Bewegungen von Nanocomputern gesteuert werden. In unserem Computerzeitalter sind wir gezwungen, den einzelligen Eukaryoten ein weiteres Zellorgan hinzuzufügen: den Nanocomputer.

Die Autoren schließen, dass der Fund von mechanischen Computern aus Mikrotubuli auch erklären kann, warum viele andere einzellige Eukaryoten trotz des Fehlens eines Gehirns und eines Nervensystems außerordentlich raffinierte und koordinierte Verhaltensweisen zeigen. Wie das Rechnen selbst funktioniert, ist noch nicht geklärt, aber einige Neurowissenschaftler haben die Idee geäußert, dass Mikrotubuli wie Quantencomputer funktionieren könnten. Woher die Computer stammen? Die populärwissenschaftliche Zeitschrift *The New Scientist* berichtete, dass „ein einzelliger Organismus einen natürlichen mechanischen Computer evolviert hat“. Interessanterweise findet sich in dem Artikel kein einziger Hinweis darauf, *wie* die Evolution dies bewirkt haben könnte. Der Begriff „evolviert“ dient hier lediglich dazu, das Offensichtliche zu verschleiern, nämlich dass der bloße Zufall keine hochentwickelten Nanocomputer hervorbringen kann.

[LARSON BT et al. (2021) A unicellular walker controlled by a microtubule-based finite state machine (preprint), <https://www.newscientist.com/article/2285141-single-celled-organism-has-evolved-a-natural-mechanical-computer/#ixzz72UJ13klF>] P. Borger