

# Von Luca bis Eva – die komplette Evolution des Menschen Teil 3: Sex

**Sexuelle Fortpflanzung – aufwendig, energieintensiv, manchmal spaßig... aber evolutionär unglaublich erfolgreich.**

**Warum teilen so viele Lebewesen ihr Erbgut mit anderen, statt sich einfach selbst zu kopieren?**

**Wie ist Sexualität überhaupt entstanden, welche Vorteile bringt sie – und was hat sich die Evolution dabei gedacht?**

**Spoiler: Sie hatte keinen Plan. Aber sie hat ein ziemlich spannendes Ergebnis hervorgebracht.**

**In diesem Video werfen wir einen Blick auf die Evolution der sexuellen Vermehrung: Schaut auch in die Beschreibung für weiterführende Literatur und Studien.**

**Los geht's!**

## Was ist Sexuelle Vermehrung?

Die sexuelle Fortpflanzung ist eine Variante der Fortpflanzung von Eukaryoten, bei der Zellkerne von zwei (oder mehr) Zellen miteinander verschmelzen (Karyogamie), wobei sich die Anzahl der Chromosomen im Kern (der Ploidiegrad) verdoppelt. Damit sich bei dieser Verschmelzung der Zellen der Chromosomensatz nicht immer weiter verdoppelt werden spezielle Zellen produziert, die wieder den halben Chromosomensatz haben, die Keimzellen. Diese Halbierung des Chromosomensatzes geschieht mittels Meiose oder auch Reduktionsteilung genannt. Um dies am Beispiel des Menschen zu verdeutlichen: Unsere Zellen haben 46 Chromosomen, die sich in 23 Paaren einordnen lassen. Sie bilden sogenannte homologe Chromosomenpaare. Das heißt jedes Chromosom und somit auch jedes Gen kommt bei uns doppelt vor. Eine Ausnahme bilden die Geschlechtschromosomen der Männer, die sich strukturell unterscheiden (X und Y-Chromosomen, Frauen haben hingegen zwei X-Chromosomen). Einen solchen Chromosomensatz nennen wir diploid. Bei der Produktion der Keimzellen, also während der Meiose, wird dieser Chromosomensatz halbiert, sodass jede Keimzelle wieder den einfachen Chromosomensatz (bei uns Menschen als 23 hat). Einen solchen einfachen Chromosomensatz bezeichnet man als haploid. Verschmelzen zwei Keimzellen wieder miteinander (das wäre die Befruchtung), haben wir wieder eine Zelle mit einem doppelten Chromosomensatz, die durch die gewöhnliche Zellteilung, die Mitose, neue genetisch identische Zellen produziert. Sexuelle Fortpflanzung ist somit ein Wechsel zwischen einer haploiden und diploiden Phase, man spricht auch von einem Kernphasenwechsel.

## Kernphasenwechsel

Bei Eukaryoten gibt es drei verschiedene Typen des Kernphasenwechsel, die danach unterschieden werden, welche der beiden Kernphasen – die haploide oder diploide – dominieren: die Haplonten, Diplonten und Diplo-Haplonten. Bei Haplonten spielt sich fast der gesamte Entwicklungszyklus in der Haplophase ( $1n$ ) ab, das heißt sie haben nur einen einfachen Chromosomensatz. Nur die befruchtete Eizelle, die Zygote, hat einen doppelten Chromosomensatz, bei der die Keimzellen miteinander

verschmelzen. Nach der Befruchtung findet eine Reduktionsteilung statt, sodass die Zellen wieder haploid sind und sich durch Mitose weiter teilen. Zu den Haplonten gehören viele Pilze, viele Algen und einige tierische Einzeller, wie die Flagellaten.

Die Diplonten sind quasi das Gegenteil der Haplonten. Bei ihnen vollzieht sich die Lebensphase fast ausschließlich in der Diplophase. Nach der Befruchtung erfolgt, anders als bei den Haplonten, keine Meiose, sondern die Zygote entwickelt sich durch Mitose zum diploiden Organismus. Aber einige der Zellen des diploiden Organismus bilden durch Meiose haploide Keimzellen, wodurch sich die Organismen wieder sexuell vermehren können. Neben einigen Algen und Pilzen und einer Reihe eukaryotischer Einzeller gehören alle Tiere zu den Diplonten.

Die Diplo-Haplonten haben eine Zwischenstellung zu den zwei oben genannten Typen. Es sind Lebewesen, bei deren Fortpflanzung abwechselnd haploide und diploide Generationen auftreten. Hierzu gehören die meisten Pflanzen. Kennzeichnend für Diplo-Haplonten ist, dass sowohl in der haploiden wie in der diploiden Phase Mitosen erfolgen. Die haploide Generation pflanzt sich geschlechtlich fort, indem sie weibliche und männliche Gameten bildet. Sie wird deshalb als Gametophyt bezeichnet. Durch die Vereinigung zweier Gameten verschiedenen Geschlechts und Befruchtung entsteht eine diploide Zygote. Die Zygote wächst durch Mitosen zum Sporophyten. Die Sporophyten bilden nach einer Meiose haploide Sporen. Aus diesen haploiden Sporen wächst der haploide Gametophyt heran und der Zyklus beginnt von vorne. In der Evolutionsgeschichte der Pflanzen kommt es dabei zur Reduktion des haploiden Gametophyten. Bei den Moosen ist der Gametophyt die dominante Phase (nämlich die grüne Moospflanze). Schon bei den Farnen ist der diploide Sporophyt dominant und bei den Samenpflanzen ist die eigentliche Pflanze der diploide Sporophyt, während der haploide Gametophyt auf wenige Zellen (den Pollenschlauch und den Embryosackzellen) reduziert ist.

Es zeigt sich also, dass es bei der Evolution der Eukaryoten zu einer Dominanz der Diplophase kam. Aber warum eigentlich dieser Kernphasenwechsel und warum überhaupt Sex? Die Ursprünge der sexuellen Fortpflanzung gelten als die Königsdisziplin der Evolutionsbiologie, weil sich die berühmtesten Naturforscher darüber den Kopf zerbrachen. Denn die sexuelle Fortpflanzung ist irgendwie paradox: bei der asexuellen Vermehrung von Zellen, also durch Klonen, teilt sich die Zelle; aus einer Zelle entstehen zwei. Die sexuelle Fortpflanzung ist das Gegenteil: hier vereinigen sich zwei Zellen zu einer und jede Zelle, die sich sexuell fortpflanzt gibt nur die Hälfte seines Genbestandes weiter. Und doch, die meisten Eukaryoten pflanzen sich sexuell fort und die wenigen, die das nicht tun, haben es sekundär wieder verloren. Viele der sich asexuell vermehrenden Eukaryoten sind aber verhältnismäßig junge Evolutionslinien, wie der Löwenzahn (der sich aber auch sexuell fortpflanzen kann) und die amerikanischen Rennechsen. Berühmt für ihre asexuelle Fortpflanzung ist die Gruppe der bdelloiden Rädertierchen, von denen etwa 300 mikroskopisch kleine Arten bekannt sind, die vor allem im Süßwasser sowie in feuchten bis nassen Böden leben. Seit mindestens 25 Mio. Jahren pflanzen sich diese Kleinstorganismen asexuell fort – sie sind die keuschen Ausnahmen in einer von Sex besessenen Welt, die wie Mönche durch ein Rotlichtviertel spazieren.

Um die Mechanismen und Vorteile der sexuellen Vermehrung zu verstehen, werfen wir einen genaueren Blick darauf, wie Zellteilung und Meiose funktionieren.

## Mitose und Meiose

Die Zellteilung der Eukaryoten wird durch den Zellzyklus reguliert. Der Zellzyklus lässt sich untergliedern in Mitose/Cytokinese und Interphase. Während der Interphase ist der Zellkern im Lichtmikroskop sichtbar und es finden die charakteristischen Zellfunktionen statt wie die DNA-Replikation. Die Interphase kann wiederum in weitere Abschnitte unterteilt werden, die G1-Phase, S-Phase, G2-Phase. In der G1-Phase betreibt die Zelle ihren gewöhnlichen Stoffwechsel, in der S-Phase wird die DNS repliziert, also vermehrt und während der G2-Phase bereitet sich die Zelle auf die Mitose vor – etwa indem sie die Proteinkomponenten synthetisiert, die im Verlauf der Mitose gebraucht werden. Spezielle

Signalproteine, insbesondere die Aktivitäten der cyclinabhängigen Kinasen (Cdks), lösen die einzelnen Phasen aus.

Die Mitose selbst lässt sich ebenfalls in einzelne Teilabschnitte einteilen. In der Prophase kondensiert die DNA zu den im Lichtmikroskop sichtbaren Chromosomen. Die Chromosomen bestehen aus zwei Chromatiden, die vom Centromer zusammengehalten werden. Diese zwei Chromatiden bestehen aus der in der S-Phase duplizierten DNS, sind also die genetisch identischen Kopien. Außerdem wird der Spindelapparat zusammengebaut. Der Spindelapparat besteht aus den Mikrotubuli, der Bestandteil des Cytoskeletts ist. Dieser Spindelapparat wird die einzelnen Chromatiden voneinander trennen, sodass jede Tochterzelle die identische Menge an DNS haben wird. In der Prometaphase löst sich die Zellkernhülle auf und der Spindelapparat heftet sich an die Chromosomen. In der Metaphase ordnen sich die Chromosomen an der Äquatorialebene an und in der Anaphase werden schließlich die einzelnen Chromatiden voneinander getrennt und wandern zu den entgegengesetzten Polen der Zelle. In der abschließenden Telophase Dekondensieren die Chromosomen, es bilden sich neue Zellkernhüllen und auch das Zellplasma teilt sich mit einer Einschnürung der Plasmamembran und es entstehen zwei Tochterzellen. Bei der Bildung der neuen Plasmamembran sind ebenfalls Elemente des Cytoskeletts verantwortlich, vor allem die Aktinfilamente und dem assoziierten Motorprotein Myosin.

Wenn wir uns die Meiose betrachten, hat sie einige Gemeinsamkeiten mit der Mitose. Es gibt hier aber ein paradoxes Phänomen: Die Meiose hat bei den meisten Eukaryoten zwei Schritte. Ähnlich wie bei der Mitose wird vorher die DNA verdoppelt. Während sich bei der Mitose die Chromosomen entlang der Äquatorialplatte anordnen und dann die Chromatiden voneinander getrennt werden, ordnen sich bei der Meiose die homologen Chromosomenpaare an der Äquatorialplatte an und ein jedes Chromosom wandert an den jeweiligen Zellpol. So entstehen zwei haploide Zellen. Die zweite Phase der Meiose entspricht dann wieder der Mitose, sodass am Ende vier haploide Zellen entstehen. Es gibt aber einige eukaryotische Einzeller bei denen die Meiose in einem Schritt abläuft. Hier wird nämlich vor der Meiose das Genom nicht verdoppelt.

Die Meiose erschöpft sich aber nicht nur in der Halbierung des Chromosomensatzes, denn ein entscheidender Schritt ist die Rekombination der Gene. Während der ersten Schritte der Meiose ordnen sich die homologen Chromosomenpaare an die Äquatorialplatte. Dabei kann es zu einem Austausch einzelner Abschnitte der homologen Chromosomenpaare kommen. Die Chromatiden der homologen Chromosomenpaare lagern sich während der Prophase 1 der Meiose parallel aneinander. Das Chromosom der Mutter befindet sich dann neben dem des Vaters. Das bedeutet aber auch, dass die einander entsprechenden Gene, z. B. für die Augenfarbe, nebeneinander liegen. Dabei können sich die Chromatiden der beiden homologen Chromosomen zufällig an manchen Stellen überkreuzen. An diesen Überkreuzungspunkten, auch Chiasma genannt, kommt es zu Brüchen an den Chromatiden und die einzelnen Genabschnitte können ausgetauscht werden. Lösen sich die homologen Chromosomenpaare voneinander enthält das mütterliche Chromosom Teile des väterlichen Chromosoms und umgekehrt. Dieser als Crossing-over bezeichnete Mechanismus erhöht die genetische Vielfalt und die Rekombination der Gene. Und das ist der Schlüssel dafür, warum sich die sexuelle Vermehrung entwickelt haben könnte.

## Warum gibt es Sex?

Die Sexualität bietet den Eukaryoten einen großen Vorteil, denn sie ermöglicht die rasche Kombination von nützlichen Mutationen aus verschiedenen Organismen oder das schnelle Eliminieren schädlicher Mutationen. Charles Darwin gehörte zu den ersten, der über die Vorzüge von Sex nachdachte, obwohl er von der Existenz von Genen und Mutationen nichts wissen konnte. Er sah den wesentlichen Vorteil von Sex in der Vitalität von Hybriden, wobei die Nachkommen zweier, nicht miteinander verwandter Eltern gesünder und fitter sind. Der deutsche Biologe August Weismann, der quasi Darwins Erbe antrat, folgerte 1904, dass durch Sex eine größere Variation erzeugt wird, auf die die natürliche Selektion

wirken kann. Anders als Darwin sah er aber den Nutzen von Sex nicht für das Individuum, sondern für die Population, da schädliche Variationen so aus der Population eliminiert werden können.

Der Vorteil der Vitalität von Hybriden liegt im Besitz zweier leicht unterschiedlicher Kopien von jedem Gen, die sich gegenseitig vertreten können. Solche gleichen Genvarianten bezeichnet man als Allele. Hat man auf den homologen Chromosomen verschiedene Allele, ist man heterozygot.

Sex alleine kann die genetische Variation nicht erhöhen, sondern nur vorhandene Variationen neu mischen. Erst durch Mutationen entstehen neue Variationen, sie können aber mittels sexueller Fortpflanzung in Populationen schneller verbreitet werden, wie schon in den 1930er Jahren der Genetiker Ronald Fischer berechnete. Nehmen wir hierfür ein Beispiel. Ereignen sich beispielsweise zwei nützliche Mutationen in jeweils unterschiedlichen Bakterienzellen, die sich nicht sexuell vermehren, so können diese –von der Möglichkeit eines horizontalen Gentransfers einmal abgesehen – nicht in einem Organismus zusammenkommen. Erst, wenn zufällig auch die zweite nützliche Mutation in einem der beiden Organismen auftritt, kann sich die positive Wirkung der beiden Mutationen addieren. Sex ist aber in der Lage, dass diese zwei nützlichen Mutationen, die bei verschiedenen Individuen auftreten zu kombinieren. Dies führt zu einer höheren Fitness und Anpassung an neue Umweltbedingungen.

Wie sieht es aber mit negativen Mutationen aus? Auch hier ist Sex hilfreich.

Die meisten Mutationen sind zwar in ihrer Wirkung neutral, doch im Laufe der Zeit können Kombinationen von Mutationen entstehen, deren schädliche Effekte sich potenzieren. Im Extremfall machen sie krank oder können sogar zum Tode führen. Biologen sprechen in diesem Zusammenhang von Mullers Ratchet – nach dem US-Genetiker Hermann Joseph Muller und dem Mechanismus der Ratsche oder Sperrklinke. In der Mechanik ist dies ein Bauteil, das zwar eine Vorwärtsbewegung ermöglicht, nicht aber ein Zurück.

Muller postulierte in den 1930er Jahren, dass es auch bei Mutationen im Erbgut von Organismen immer nur eine Richtung gibt – hin zu einer Anreicherung. Irgendwann kommt dadurch der Punkt, an dem wichtige Gene mutationsbedingt nicht mehr korrekt funktionieren und ein Organismus krank wird oder stirbt. Für eine asexuelle Spezies aus genetischen Klonen kann dies das Ende bedeuten. Ohne Sex reichern Populationen schädliche Mutationen an und bringen so jede Generation näher ans Aussterben.

Sex kann aber durch das Zusammenführen unmutierter Gene im selben Individuum unbeschädigte Individuen wiederherstellen. Durch die Meiose werden die Gene neu gemischt und rekombiniert. Weil dabei ganze DNA-Abschnitte und Chromosomen „herausgemendelt“ werden und nicht in die Keimzellen gelangen, entstehen einige Nachkommen, denen ein ganzer Packen dieser Mutationen fehlt. Sie starten demnach mit einem „frischen“, mutationsärmeren Genom ins Leben.

Stellen wir uns hierfür, um das Prinzip zu verstehen, zwei schrottreife Autos vor, das eine hat einen Getriebe- und das andere einen Motorschaden. Dann funktioniert Sex wie ein Mechaniker, der durch Zusammenfügen der funktionsfähigen Teile ein funktionierendes Auto zusammenbaut. Doch anders als ein Mechaniker macht sich Sex ebenfalls die Mühe, die defekten Teile zusammenzufügen, um einen funktionslosen Schrotthaufen herzustellen. Diese Schrotthaufen, also bildlich gesprochen für die Individuen mit den schlechten Mutationen, haben eine geringere Fitness und sterben mit der Zeit aus. Ihr Erbgut hat so viele schädliche Mutationen erhalten, dass sie nicht lebensfähig sind – sie sterben oft schon vor der Geburt. Dies ist zwar für das einzelne Individuum fatal, wirkt sich aber günstig auf das Wohlergehen der Gesamtpopulation aus. Denn dadurch werden regelmäßig mehrere schädliche Mutationen auf einmal aus dem Genpool der Art entfernt – so jedenfalls besagt es Mullers Ratschen-Hypothese.

Tatsächlich finden sich auch im menschlichen Genom Belege für diesen Eliminationseffekt. Ausgangspunkt einer Studie aus dem Jahr 2015 war die Tatsache, dass manche Bereiche unserer Chromosomen häufiger umverteilt werden als andere. Für ihre Studie untersuchten die Wissenschaftler am Genom von 1.400 Menschen aus aller Welt, ob sich die Zahl der angehäuften Mutationen in diesen Rekombinations-Hotspots von denen weniger veränderlichen Regionen unterscheidet. Und tatsächlich:

Exons in Regionen mit geringer Rekombination sind signifikant mit schädlichen und krankmachenden Genvarianten angereichert. Umgekehrt wiesen die Rekombinations-Hotspots im Genom eine deutlich geringere Mutationsdichte auf.

In die gleiche Richtung weist eine Studie aus dem Jahr 2017 eines Teams um den berühmten Evolutionsgenetikers Alexey Kondrashov. Sie hatten anhand der Mutationsrate von Mensch und Fruchtfliege überprüft, wie viele und welche schädlichen Mutationen sich im Verlauf der Generationen angereichert haben müssten und wie viele es tatsächlich sind. Damit wollten sie überprüfen, ob die Rekombination tatsächlich so selektiv wirkt, dass die besonders schädlichen Mutationen verstärkt eliminiert werden.

Das Ergebnis: Während die Dichte der Mutationen mit keinem oder nur latent schädlichem Effekt in realen Populationen mit dem Modell übereinstimmten, galt dies für stärker schädliche Mutationen nicht: Ihre Zahl ist signifikant geringer als sie sein müsste. Der Effekt weist darauf hin, dass die natürliche Auslese stärker auf Individuen mit Ansammlungen schädlicher Mutationen wirkt. Der Grund liegt darin, dass Mutationen nicht isoliert voneinander wirken. Viele Gene erfüllen dieselbe Funktion und können sich so gegenseitig gegen ernsthaften Schaden puffern. Wenn jedoch mehrere Mutationen aneinanderkoppeln, kann eine Mutation die Wirkung der zweiten verstärken. Der Schaden durch eine zusätzliche Mutation steigert sich dann nicht additiv, sondern exponentiell. Sexuelle Vermehrung kann solche schädlichen Effekte schneller eliminieren.

Ein weiterer Vorteil der sexuellen Vermehrung liefert die Red-Queen-Hypothese – benannt nach der Figur aus „Alice hinter den Spiegeln“. Diese erklärt Alice in Lewis Carrolls Buch: „Hierzulande musst du so schnell rennen wie du kannst, wenn du am gleichen Fleck bleiben willst.“ Übertragen auf die Evolutionsbiologie soll dies den ständigen Wettlauf zwischen Räuber und Beute, Parasiten und Wirten oder auch Krankheitserregern und ihren Wirten illustrieren.

Und auch an diesem Punkt kommt der Sex ins Spiel: Sich geschlechtlich vermehrende Organismen mischen ihre Gene während der Bildung der Keimzellen und bei der Verschmelzung des Erbguts zweier Individuen. Die Nachkommen können so neue Genkombinationen entwickeln, die ihnen helfen, einer Infektion zu entgehen.

Im Falle einer Epidemie beispielsweise kann die größere genetische Variabilität dazu führen, dass einige Individuen von Natur aus bessere Abwehrkräfte gegen den Erreger haben oder dass sie komplett resistent sind. Bei einer asexuellen Population hingegen stammen die Individuen oft von wenigen Ausgangsexemplaren ab und sind daher genetisch weitgehend identisch. Sind sie für die Infektion anfällig, kann ein Erreger im Extremfall die gesamte Population dahintragen.

Unter welchen Bedingungen könnte ein Übergang von der asexuellen zur sexuellen Fortpflanzung erfolgt sein? Der Blick in die Natur zeigt, dass die Rekombination durch sexuelle Fortpflanzung vor allem dann ihre Vorteile ausspielen kann, wenn sich die Umweltbedingungen häufig verändern. Ähnlich sieht es aus, wenn eine Art einen neuen Lebensraum erschließt: Weil sie an diesen noch nicht optimal angepasst ist, verbessert eine variantenreichere Nachkommenschaft die Überlebenschancen der Spezies. Denn dies erhöht die Chance, dass zumindest einige der Nachkommen die für die neuen Bedingungen nötigen Eigenschaften aufweisen. Einige Lebewesen wechseln zwischen sexueller und asexueller Vermehrung, so bei vielen eukaryotischen Einzellern, aber auch bei einigen Schnecken, beim Löwenzahn, einigen Gräsern oder Echten. Je nachdem welche Umweltbedingungen von Vorteil sind, kann dieser Wechsel stattfinden. Besonders dann, wenn sich Umweltbedingungen schnell ändern, können Organismen, die sich sexuell fortpflanzen, also deutlich im Vorteil sein.

## Ursprung des Kernphasenwechsels

Ein Wechsel zwischen stabilisierenden und sich ändernden Umweltbedingungen könnte eine Ursache für den Kernphasenwechsel sein. Der Wechsel zwischen haploider und diploider Phase, der wahrscheinlich ursprünglich vorhanden war, könnte zu Beginn also als Anpassungen an verschiedene Umweltbedingungen angesehen werden.

Vielleicht haben sich ursprünglich bei schlechter werdenden Umweltbedingungen (Trockenphasen, Nahrungsmangel etc.) oder z. B. dem verstärkten Befall genetischer Parasiten (wie Viren) je zwei Organismen zusammengetan (eine sogenannte Syngamie), um gemeinsam als Dauerzelle zu überleben. Die Kombination zweier Genome in einer Zelle könnte zum Beispiel Reparaturprozesse bei Schäden an der Erbsubstanz erleichtert haben: War jeweils nur eines der beiden Genome an einer bestimmten Stelle beschädigt, so könnte das andere als Vorlage für einen Reparaturprozess gedient haben. Diskutiert werden in diesem Zusammenhang nicht nur ungünstige Umwelteinflüsse, sondern auch DNA-Schäden durch reaktive Formen des Sauerstoffs. Diese traten nach dem Erwerb der Sauerstoffatmung durch die Eukaryoten vermehrt auf. Später könnte sich die sexuelle Fortpflanzung als vorteilhaft für den Austausch nützlicher Mutationen erwiesen und somit durchgesetzt haben. Die diploide Phase war widerstandsfähiger gegen DNA-Schäden. Aber bei begrenztem Nährstoffangebot wuchsen haploide Phasen schneller als diploide: alleine, weil schon die Größe des Genoms nur die Hälfte ausmachte. Eine verbesserte Versorgung mit Nährstoffen, vielleicht in Kombination mit der Ausnutzung der Mitochondrien und eines verbesserten Schutzes vor Sauerstoffradikalen, begünstigten die diploide Phase.

Denkbar wäre auch, dass eine Diploidie versehentlich durch Replikation des Kerngenoms ohne anschließende Zellteilung entstand und dass die Rückkehr zur Haploidie als Korrekturmaßnahme angestrebt wurde. Da in verschiedenen ökologischen Situationen entweder Haploidie oder ein höherer Ploidiegrad bevorzugt werden kann, besteht eine Variante dieses Szenarios darin, dass sich ein Proto-Meiose-Endoreplikationszyklus entwickelt hat, um zwischen den Ploidiegraden zu wechseln. Der daraus resultierende Lebenszyklus könnte modernen „parasexuellen“ Pilzen ähneln, bei denen diploide Zellen bei nachfolgenden mitotischen Teilungen Chromosomen verlieren, was über Zwischenstufen zu Haploidie führt. Auch viele andere moderne Eukaryoten erhöhen und verringern ihre Ploidie somatisch, je nach Wachstumsstadium oder spezifischen Umweltreizen.

## Horizontaler Gentransfer und der Übergang zur Sexualität

Wenn sexuelle Fortpflanzung so viele Vorteile bietet, sollten wir dennoch die Ausnahmen von der Regel nicht vergessen: jene puritanischen Mönche im Tierreich, die auf Sex verzichten, wie die vorhin angesprochenen Rädertierchen. Warum haben sie die sexuelle Vermehrung aufgegeben? Wie konnten sie Mullers Ratsche, also der Anreicherung schädlicher Mutationen im Laufe der Zeit, entgehen? Als rein asexuelle Tiergruppe fehlt ihnen die Möglichkeit, diese Genveränderungen durch die genetische Rekombination loszuwerden. Im Prinzip widersprechen diese Rädertierchen damit gleich mehreren Hypothesen zur Notwendigkeit der sexuellen Fortpflanzung.

Beachten wir auch die anderen sich asexuell vermehrenden Organismen: Bakterien und Archaeen. Auch wenn sie nicht die Komplexität der Eukaryoten erreichen – schlecht geht es ihnen nicht, sie florieren sogar, besiedeln ökologische Nischen, die teilweise für uns undenkbar sind, verwenden Stoffwechselwege, die für uns undenkbar sind und existieren länger als alle Eukaryoten. Warum häufen sich bei ihnen nicht die schädlichen Mutationen an? Die Erklärung ist, dass auch sie ihre eigene Form der Rekombination der Gene haben: den horizontalen Gentransfer. Wir haben ihn in der letzten Episode schon angesprochen. Horizontaler Gentransfer (HGT) bezeichnet eine Übertragung von genetischem Material nicht entlang der Abstammungslinie, also nicht von einer Generation zur darauffolgenden, sondern „horizontal“ von einem Organismus in einen bereits existierenden anderen hinein. Dies kann

die genetische Vielfalt der Bakterien deutlich erhöhen und so können sie Mullers Ratsche auch entkommen. Es gibt drei verschiedene Typen: Transduktion, Transformation und Konjugation. Transduktion bezeichnet den Austausch genetischen Materials über einen Bakteriophagen, also Bakterien befallende Viren, und die anschließende Integration in das Genom. Bei der Transformation wird freie DNA aus der Umgebung in die Zelle aufgenommen und in das Genom eingebaut. Bei der Konjugation wird direkt genetisches Material, meist in Form von Plasmiden, zwischen zwei Bakterien ausgetauscht.

Horizontaler Gentransfer kommt zwar bei Eukaryoten selten vor – aber er existiert und so auch bei den Rädertierchen. Im Genom der Rädertierchen fanden wir viele Gene, die aus Bakterien, Pilzen und Pflanzen zu stammen schienen – bis zu 10 Prozent ihres Genoms stammen aus artfremder DNA. Diesem Umstand ist es zu verdanken, dass Rädertierchen so lange ohne Sex gedeihen können und die Tatsache, dass es einen horizontalen Gentransfer gibt, kann es Schlüssel zur Klärung der Evolution der Meiose sein.

Gehen wir aber kurz auf die allgemeine Zellteilung ein:

Bei den meisten Bakterien und Archaeen ist die gewöhnliche Zellteilung verhältnismäßig einfach. Die meisten Bakterien haben nur ein Chromosom. Bei einer Zellteilung muss dieses verdoppelt werden. Bakterien haben entsprechend einen Replikationsursprung, also einen Startpunkt für die Verdoppelung der DNA. Wichtig ist: Bakterienchromosomen weisen immer nur einen Replikationsursprung auf, wobei das Chromosom am Replikationsstartpunkt an die Zellwand gebunden ist. Ist die Replikation abgeschlossen, löst sich das Chromosom wieder von der Zellwand.

Bei Archaeen sind die Replikationsursprünge ähnlich organisiert wie bei Bakterien, sie haben aber oft mehrere Replikationsursprünge pro Chromosom. Eukaryoten haben hingegen mehrere Replikationsursprünge pro Chromosom, was wegen der Größe eukaryotischer Chromosomen sinnvoll ist, da so die Replikation schneller läuft.

Bei der Mitose, also der Zellteilung der Eukaryoten wird zunächst auch das Genom vervielfältigt, sie verläuft aber komplexer als die Zellteilung bei Bakterien. Eukaryoten haben mehrere Chromosomen, die an die Äquatorialplatte angeordnet werden müssen, die Zellkernmembran muss sich auflösen und wieder neu bilden und verantwortlich für den Transport der Chromosomen wie auch der Einschnürung der Zellmembran sind verschiedene Elemente des Cytoskeletts. Ähnlich komplex verläuft auch die Meiose, die aber bei den meisten Eukaryoten aus zwei Stufen besteht und ironischerweise sich das Genom verdoppelt, bevor die homologen Chromosomenpaare voneinander getrennt werden. Der „Sprung“ zwischen der Zellteilung der Bakterien und Archaeen, sowie der Mitose und Meiose der Eukaryoten scheint unüberwindbar. Doch genauere Untersuchungen lassen durchaus einige Übergänge erschließen.

Mittlerweile sind eine Reihe an Bakterien und Archaeen bekannt, die eine extreme Polyploidie, also mehr als ein Chromosom, haben. Bei Eukaryoten finden sich auch verschiedene Mitosetypen. Während bei tierischen und pflanzlichen Zellen sich während der Mitose die Kernmembran auflöst, gibt es bei einer Reihe von eukaryotischen Einzellern eine geschlossene Pleuomitose. Sie ist insofern der bakteriellen Zellteilung ähnlich, als dass die Kernmembran intakt bleibt und der Spindelapparat an die Kernmembran haftet. Aufgrund der Ähnlichkeit zwischen Mitose und Meiose, so z. B. die Rolle des Spindelapparates oder die Regulierung der Zellteilung, gehen einige Hypothesen davon aus, dass die Meiose bei den Eukaryoten aus der Mitose entstanden ist. Es gibt aber auch Hinweise darauf, dass die Meiose oder zumindest gewisse Vorstufen, sich schon bei Bakterien und Archaeen entwickelt haben können. Eine Form des horizontalen Gentransfers, die Transformation, bei der DNA von einer Zelle in das umgebende Medium freigesetzt und dann von einer anderen aufgenommen wird, kann man als eine Vorstufe der Sexualität sehen. Die Transformation ist ebenso wie die Meiose ein komplexer Prozess, der die Funktion zahlreicher Genprodukte erfordert. Eine Ähnlichkeit der sexuellen Vermehrung mit der Transformation besteht darin, dass sich die von zwei verschiedenen Individuen stammende DNA zusammenfügt, so dass homologe Sequenzen aneinander angeglichen werden, woraufhin ein Austausch von genetischer Information erfolgt. Nachdem das neue rekombinante

Chromosom entstanden ist, wird es an die Nachkommen weitergegeben. Diese genetische Rekombination wird durch Enzyme katalysiert und bei Bakterien ist eines dieser Schlüsselenzyme RecA und dieses hat zwei funktionell ähnliche Gegenstücke, die in der eukaryontischen Meiose wirken, RAD51 und DMC1.

Die Theorie, dass die Meiose aus der Transformation der Bakterien und Archaeen hervorgegangen ist, wird auch dadurch gestützt, dass frühe divergierende Eukaryontenlinien wichtige Schlüsselgene für die Meiose besitzen. Dies würde bedeuten, dass der Vorläufer der Meiose bereits bei den Vorfahren der Eukaryonten vorhanden war. Wenn die Meiose aus der Transformation entstanden ist, könnten sich Mitose und Meiose während der frühen Evolution der Eukaryoten parallel entwickelt haben. Beide Prozesse nutzen gemeinsame molekulare Komponenten, wobei sich die Mitose aus der molekularen Maschinerie entwickelt hat, die von Bakterien und Archaeen für die DNA-Replikation genutzt wird, und die Meiose aus der Transformation hervorgegangen ist. Zusätzlich nutzte die Meiose die sich entwickelnde molekulare Maschinerie für die DNA-Replikation.

Rekombination durch Sex funktioniert auch effizienter als nur durch horizontalen Gentransfer. Der Erwerb von Mitochondrien und der Transport ihres Genoms in die Wirtszelle hatte bei den Eukaryoten nicht nur zu einer erhöhten Mutationsrate, sondern auch einem größeren Genom geführt. Je größer das Genom ist, desto schwieriger wird es, das „richtige“ Gen durch den horizontalen Gentransfer zu erwischen. Dass ein Genom über alle benötigten Gene verfügt und diese voll funktionsfähig sind, lässt sich nur gewährleisten, indem alle Gene erhalten bleiben und sie regelmäßig über das gesamte Genom hinweg rekombiniert werden. Das geht nicht mit horizontalem Gentransfer, sondern nur mit Sex – „totalem Sex“, der die Rekombination über das ganze Genom umfasst.

Sowohl Bakterien als auch Archaeen besitzen gewöhnlich ein einziges ringförmiges Chromosom, während Eukaryoten mehrere gestreckte Chromosomen haben. Warum? Eine simple Erklärung lautet: Introns können Fehler erzeugen, wenn sie sich ins Genom spleißen und wieder ausschneiden. Gelingt es ihnen nicht, die beiden Enden eines Chromosoms nach dem Herausschneiden wieder zu verbinden, entsteht eine Lücke im Chromosom. Eine einzelne Lücke in einem ringförmigen Chromosom ergibt ein gestrecktes Chromosom; mehrere Lücken ergeben mehrere gestreckte Chromosomen. Auf diese Weise könnten von mobilen Introns produzierte Rekombinationsfehler den frühen Eukaryoten zu mehrfachen gestreckten Chromosomen verholfen haben.

Das bescherte den Eukaryoten höchstwahrscheinlich verheerende Probleme mit dem Zellzyklus. Die Zellen müssen jeweils unterschiedlich viele Chromosomen besessen haben, die jeweils verschiedene Mutationen aufwiesen. Zudem übernahmen sie wohl neue Gene und DNA von ihren Mitochondrien. Kopierfehler hätten zweifellos zur Duplikation von Chromosomen geführt. Nur mittels sexueller Rekombination konnten funktionsfähige Gene ansammeln und nicht funktionierende loswerden. Diese Tendenz zum Ansammeln neuer Gene und DNA durch Sex und Rekombination ist eine einfache Erklärung für die Vergrößerung früher eukaryotischer Genome.

Doch hier bleibt eine Frage zu klären: ein wichtiger Bestandteil der molekularen Maschinerie der Zellteilung ist die Ausbildung des Spindelapparates und des Cytoskelettes an sich.

## Evolution des Cytoskelettes

Das Cytoskelett ist ein Zellorganell in eukaryotischen Zellen. Es bildet ein Netzwerk im Cytoplasma der Zelle und besteht aus verschiedenen Proteinen und länglichen Filamenten. Diese sind dynamisch beweglich und können auf- und abgebaut werden. Es gibt drei Hauptbestandteile: Mikrotubuli, Mikrofilamente und Intermediärfilamente.



Die Hauptaufgabe des Zytoskeletts ist es, der Zelle eine mechanische Stabilität zu geben. Es ist also auch innerhalb deines Körpers dafür verantwortlich, dass sich deine Zellen nicht allzu stark verformen können. Außerdem ist es für den Stofftransport und die Fortbewegung der gesamten Zelle zuständig.

Die Mikrotubuli sind die größten Bestandteile des Cytoskeletts, sie sind zwischen 15 und 25 nm groß und setzen sich aus Tubulin zusammen. Eine der wichtigen Aufgaben der Mikrotubuli ist die Bildung des Spindelapparates und damit die richtige Anordnung der Chromosomen. Sie sind aber auch für den Stofftransport der Zelle verantwortlich. Die zweite Filamentgruppe bilden die Mikrofilamente, die mit 6 nm die kleinsten Filamente des Cytoskeletts sind. Sie bestehen aus dem Protein Aktin und stabilisieren die Form der Zelle. In Muskelzellen liegen sehr viele Aktinfilamente und tragen zur Muskelkontraktion bei. Den größten Einfluss auf die mechanische Stabilität der Zelle haben die Intermediärfilamente. Außerdem stehen sie mit den Mikrotubuli und den Aktinfilamenten in ständiger Verbindung und tauschen Informationen in Form von Proteinen aus.

Assoziiert mit dem Cytoskelett sind eine Reihe an Motorproteinen. Hauptaufgabe von Motorproteinen ist der intrazelluläre Transport von Zellorganellen und Vesikeln. Myosine bewegen sich entlang der Aktinfilamente, während andere Motorproteine, wie die Kinesine sich an den Mikrotubuli bewegen. Wenige Änderungen an einzelnen Proteindomänen der Motorproteine können spezialisierte Aufgaben übernehmen, so die Myosine in Muskelzellen.

Ursprünglich wurde das Cytoskelett als ein Alleinstellungsmerkmal eukaryotischer Zellen angesehen, bis homologe Strukturen auch in Bakterien gefunden wurden. Eigentlich ist diese Vermutung nicht weit hergeholt. Wenn Eukaryoten aus der Endosymbiose von Bakterien und Archaeen entstanden sind, so sollten sich Vorstufen dieser Proteine auch in diesen finden. Cytoskelettproteine, Motorproteine und andere, werden als eukaryotische Signaturproteine (ESPs) bezeichnet, da sie an wichtigen eukaryotischen Prozessen beteiligt sind und unter Eukaryoten konserviert werden. Betrachten wir hierfür eine bestimmte Gruppe der Archaeen, die sogenannten Asgard-Archaeen, die wir in der letzten Episode kennengelernt haben und dort schon angerissen haben, dass diese Gruppe über aktinähnliche Proteine verfügen, die ihnen die Phagocytose ermöglichen.

Ein tubulinähnliches Protein in Prokaryoten ist FtsZ, das bei prokaryotischen Zellteilungen einen „Ring“ in der Mitte der Zelle bildet, der die Zellteilung bewirkt. Kürzlich wurde CetZ in Archaea entdeckt, das die Zellform steuert. Sie sind also nicht nur in Bezug auf die Proteinstruktur ähnlich, sondern auch in ihrer Funktion ähnlich wie Tubulin. Zu den aktinähnlichen Proteinen gehören MreB, FtsA, MamK und Crenactin. MreB bildet dynamische Formen, die sich oft zu Spiralen zusammenfügen, und reguliert die Zellform (häufig in stäbchenförmigen Bakterien zu finden). Das archaische Crenactin ist dem Aktin am ähnlichsten und bildet fast identische Anordnungen. Beide bilden parallele, doppelsträngige Filamente mit einer ähnlichen helikalen Anordnung, und die einzelnen Untereinheiten in einem Crenactin-Filament interagieren wie die in einem Aktin-Filament. Sogar Profiline (Proteine, die das Aktin-Zytoskelett regulieren) kommen in Archaeen vor.

Was die Intermediärfilamente angeht, so soll erwähnt werden, dass diese nur bei Tieren vorkommen. Sie waren also wahrscheinlich nicht am Ursprung der Eukaryoten vorhanden. Es wurden einige Vergleiche mit dem prokaryotischen Protein CreS angestellt, aber das ist nicht sehr sicher. Wenn CreS also mit Intermediärfilamenten verwandt ist, könnte es ein Beispiel für horizontalen Gentransfer sein. Viele dieser prokaryotischen Proteine sind also an der Steuerung der Zellform beteiligt, manchmal indem sie die Zellteilung gezielt veranlassen und manchmal auch durch aktive DNA-Segregation. Es hat sich sogar herausgestellt, dass der ESCRT-Komplex, der für die Membranabtrennung (Aufspaltung der Zellmembran in separate Tochterzellen) bei Eukaryoten von entscheidender Bedeutung ist, auch in Archaeen vorkommt.

Betrachten wir uns den Spindelapparat näher. Der Spindelapparat wird aus drei Mikrotubulus-Arten aufgebaut. Das sind die Polar-, Astral- und Kinetochor-Mikrotubuli. Die polaren Mikrotubuli sind von Zellpol zu Zellpol aufgespannt. Sie können somit über die Äquatorialebene des Spindelapparates

hinausreichen. Die astralen Mikrotubuli stellen die Verbindung zum Cytoskelett her. Sie sind dabei sternförmig um die Zellpole angeordnet.

Die Kinetochor-Mikrotubuli sind maßgeblich an der Trennung der Chromosomen beteiligt und binden an die Kinetochoren der Chromosomen, die am Centromer sitzen. Sie sind eine Bindungsstelle für einen Kinetochor-Mikrotubulus. Nachdem an den Kinetochor angedockt wurde, werden die Chromosomen auseinandergezogen.

Bei Bakterien ist ein sogenanntes ParMCR-System vorhanden, das einige Plasmide verwenden, um sich während der Zellteilung aufzuteilen und sicherzustellen, dass jede Tochterzelle eine Kopie erbt. Es handelt sich im Grunde um eine chromosomale Segregation, aber für Plasmide. Wie der Name schon sagt, besteht das ParMCR-System aus drei Teilen: einer zentromerähnlichen Bindungsstelle, einem Motorprotein, das für die Trennung verantwortlich ist, und einem Adapterprotein, das die beiden verbindet. ParM ist das Motorprotein. Es hat also Homologien zum Spindelapparat der Mitose und Meiose. Aber was ist mit dem Kinetochor? Dieser Komplex besteht aus verschiedenen Modulen. Für einige davon gibt es homologe Proteine in Prokaryoten. Für andere zeigen sie Merkmale der Evolution durch Genduplikation aus eukaryotischen Genen, die andere Funktionen hatten.

Was die Motorproteine angeht, so ist ihr Ursprung etwas mysteriöser, das heißt aber nicht, dass wir über sie nichts wissen.

Myosin und Kinesin sind miteinander verwandt und gehören alle zur Familie der P-Loop-NTPasen. Obwohl das prototypische Motorprotein nicht anhand ihrer vorhandenen Strukturen zurückverfolgt werden kann, sollte betont werden, dass eine Reihe von Motor-Proteinen in ihrer Klasse, darunter Translationselongationsfaktoren, Helikasen und Proteasomen, dafür bekannt sind, Kraft zu erzeugen. Diese Proteine könnten mit dem herkömmlichen Motorprotein, das am Ursprung der Zellevolution steht, verwandt sein. Das Myosin der Klasse II, das bipolare Filamente bildet, entstand, nachdem sich das unkonventionelle Myosin als Transporter entwickelt hatte. Die Interaktion von bipolaren Myosin-II-Filamenten und Aktinfilamenten ermöglichte eine neue Art der Motilität: die Kontraktion. Die Kontraktion treibt die Erzeugung von Muskelkraft an und trägt auch zur Bewegung der Amöben bei, die ebenfalls von der Kontraktion von Aktin und Myosin II unter der Zellmembran abhängt. Die Kontraktion ermöglichte auch eine effiziente Zellteilung in Zellen durch die Bildung kontraktiler Ringe, was die Entwicklung mehrzelliger Organismen unterstützte. In ähnlicher Weise steuern die Wechselwirkungen von Dynein mit Mikrotubuli die Bewegungen eukaryotischer Geißeln zum Schwimmen.

Auch wenn hier viele Fragen noch ungeklärt sind, kann sich die Mitose und Meiose aus einer einfachen Form der Zellteilung, wie sie in Bakterien stattfindet, entwickelt haben und die dazu notwendigen Proteine waren auch ansatzweise vorhanden.

## Evolution der Keimzellen

Stellen wir uns eine letzte und vielleicht provokante Frage: warum gibt es in der Biologie nur zwei Geschlechter?

Die Biologie liefert eine klare Definition des Geschlechts, die sich in einschlägigen Lehrbüchern und Fachaufsätzen finden: Sie beziehen den Begriff des Geschlechts wenig überraschend auf den Fortpflanzungsapparat und treffen die Unterscheidung zwischen „männlich“ und „weiblich“ als Entsprechung zum Unterschied zwischen zwei Arten von Keimzellen. Die Körper der Mitglieder des männlichen Geschlechts sind auf die Produktion kleiner Keimzellen (Spermien) ausgerichtet, die Körper der Mitglieder des weiblichen Geschlechts auf die Produktion großer Keimzellen (Eizellen).

Zweigeschlechtliche Wesen, sogenannte echte Zwitter, die z. B. bei vielen Pflanzen vorkommen, sind kein drittes Geschlecht, sondern haben die beiden allein existierenden Geschlechter gleichzeitig. Und Organismen, die, wie der Clownfisch, ihr Geschlecht ändern können, haben dafür kein buntes Spektrum von Optionen zur Auswahl, sondern genau zwei. Die Rede von der „Ausrichtung“ trägt dem Umstand

Rechnung, dass aus verschiedenen Gründen (Präpubertät, Menopause, Entwicklungs- oder Funktionsstörungen) nicht jedes Individuum eines Geschlechts auch tatsächlich die entsprechenden Keimzellen produzieren wird – die bloße Ausrichtung auf deren Produktion genügt. Gehirnstrukturen, Verhaltensweisen, sexuelle Orientierung, Aussehen, Hormone und selbst Chromosomensätze liegen hingegen der biologischen Unterscheidung von weiblichen und männlichen Organismen ausdrücklich nicht zugrunde. Die Gleichung „Wesen mit XX-Chromosomen = weibliches Wesen“ ist also falsch. Verschiedene Chromosomensätze und hormonale Einflüsse etwa sind lediglich ein Mechanismus, welcher in Organismen die Entwicklung in Richtung der Produktion von kleinen oder großen Keimzellen verursacht – aber es ist diese gerichtete Entwicklung selbst, welche das Geschlecht definiert, nicht der sie verursachende Mechanismus (der zwischen verschiedenen Arten erheblich differieren kann und innerartlich nicht in jedem individuellen Fall denselben Effekt zeitigt).

Dies bedeutet auch, dass Individuen mit biologischen Störungen der sexuellen Entwicklung (sogenannte Intersexualität) in keiner Weise den geschlechtlichen Dualismus in Frage stellen. Sie lassen sich meist eindeutig dem einen oder dem anderen Geschlecht zuordnen und immer eindeutig keinem dritten, da es keinen dritten Keimzellentyp gibt. Eine solche Definition definiert männlich und weiblich in der Tat durch ihre biologische Ausstattung, aber es reduziert sie nicht auf sie.

Da Männchen und Weibchen grundsätzlich durch die von ihnen produzierten Keimzellen definiert werden, bedeutet das Verständnis der Ursprünge der beiden Geschlechter, dass wir verstehen müssen, warum es zwei verschiedene Größen von Keimzellen gibt. Daher müssen wir die Geschlechter bis zu den Ursprüngen der Keimzellen zurückverfolgen - den primären biologischen Vehikeln, durch die die sexuelle Fortpflanzung stattfindet.

Die sexuelle Vermehrung entstand vor etwa 2 Milliarden Jahren, also etwa zu Beginn der Entstehung der Eukaryoten. Damals gab es aber noch keine Männchen und Weibchen!

Es mag paradox erscheinen, aber die sexuelle Fortpflanzung ist auch ohne die Existenz von Geschlechtern möglich. Vor ein bis zwei Milliarden Jahren fand die sexuelle Fortpflanzung größtenteils nicht durch die Verschmelzung von Keimzellen unterschiedlicher Größe und Form, also Spermien und Eizellen statt, sondern durch die Verschmelzung von Keimzellen, die gleich groß waren. Diese Form der sexuellen Fortpflanzung wird als Isogamie (iso = gleich; gamos = Ehe) bezeichnet; sie ist am häufigsten bei einzelligen Organismen, einigen Arten von mehrzelligen Algen und Pilzen zu finden.

Isogamie liegt vor, wenn alle Keimzellen morphologisch ähnlich sind, insbesondere in der Größe, und wenn der Beitrag des genetischen Materials und der Ressourcen zur Zygote zu gleichen Teilen zwischen den beiden Elternteilen aufgeteilt ist.

Die Kompatibilität der Keimzellen (d. h. welche miteinander verschmelzen können) wird durch molekulare Mechanismen bestimmt, die als Schlüssel- und Schlosssysteme fungieren und als Paarungstypen bekannt sind.

Paarungstypen sind genetische Mechanismen, die die Kompatibilität zwischen verschmelzenden Gameten regulieren. Die Kompatibilität zwischen unterschiedlichen Paarungstypen wird durch verschiedene Versionen desselben Gens, also Allele, bestimmt. Wenn zwei Gameten jeweils dasselbe Allel haben (z. B. + und + oder – und –), dann bilden sie normalerweise keine Nachkommen, zwei Gameten mit unterschiedlichen Allelen (+ und -) hingegen schon. Man kann sich das wie Magnete vorstellen, bei denen sich entgegengesetzte Pole anziehen, während gleiche Pole sich abstoßen. Gameten mit unterschiedlichen Paarungstypen sind kompatibel, während dies bei Gameten mit demselben Typ nicht der Fall ist. Solche Paarungstypen tragen dazu bei, Inzucht zu reduzieren und die genetische Vielfalt bei Mikroorganismen zu fördern.

Einige Pilze können hierbei Tausende von Paarungstypen aufweisen. Dies geschieht, wenn es mehrere Stellen im Genom gibt, an denen über die Kompatibilität entschieden wird (sogenannte Paarungstyp-Loci), und jeder Locus viele mögliche Allele haben kann. Multipliziert man alle möglichen Kombinationen, so erhält man schnell Zehntausende verschiedener Paarungsoptionen. Z. B. hat die Art

Schizophyllum commune, ein holzzersetzender Pilz vier Gen-Kompatibilitätsgruppen. Gruppe A-alpha hat 9 Genvarianten, A-beta hat 32, B-alpha hat 9 und B-beta hat 9. Multipliziert man die möglichen Kombinationen miteinander ( $9 \times 32 \times 9 \times 9$ ), erhält man 23.328 Paarungstypen. Aber freut euch nicht zu früh. Dies sind nur Paarungstypen, keine Geschlechter, die dieser Pilzart Tausende von Möglichkeiten bieten, ihre gleich großen Gameten zu verschmelzen.

Mit den vorhandenen Paarungstypen, die unterschiedliche Keimzellengenotypen für die Verschmelzung erfordern, waren die Voraussetzungen für die Entstehung von männlichen und weiblichen Geschlechtern gegeben. Alles, was noch fehlte, war eine Divergenz der Keimzellen von ähnlichen Größen zu unterschiedlichen Größen und Formen.

Im Laufe der Evolution wurden die Eukaryoten immer komplexer, und mit der Entwicklung der Vielzelligkeit wuchs auch die Größe der Organismen. Diese Zunahme der mehrzelligen Komplexität machte es erforderlich, mehr Ressourcen für jede sich entwickelnde Zygote bereitzustellen, und diese erhöhte Nachfrage nach Ressourcen erforderte größere Keimzellen.

Bei dieser Vergrößerung der Keimzellen trat jedoch ein Problem auf: Große Keimzellen sind zwar für das Überleben und Wachstum der Zygote erforderlich, sie wurden aber dadurch langsamer und schwerer. Weil sie auch größer wurden, waren sie auch nicht so zahlreich. Bei der Meiose aus einer Mutterzelle entstehen vier haploide Keimzellen. Bei den kleinen Spermien sind alle vier entstandenen Zellen funktional. Bei der Entstehung der Eizelle geben jedoch drei Keimzellen ihr Zellplasma (und damit ihre Nährstoffe) an die vierte Zelle ab. Sie degenerieren und werden zu den Polkörpern, sodass am Ende nur eine Eizelle aus ursprünglich vier Keimzellen entsteht. Weil die Keimzellen so groß und selten wurden, war es zunehmend schwerer sich zu finden um miteinander zu verschmelzen. Da aber die Eukaryoten immer komplexer wurden, war diese große Keimzelle eine Notwendigkeit um genügend Ressourcen bereitzustellen. Gleichzeitig musste aber die Effizienz der sexuellen Fortpflanzung gewährleistet werden, d. h. die Keimzellen mussten miteinander verschmelzen.

Das bedeutete, dass für ein möglichst effizientes System es wenige große Keimzellen geben musste, die viele Ressourcen für das Überleben der Zygote hatten und viele kleine Keimzellen, die weniger Ressourcen hatten, dafür aber schnell genug waren, um eine erfolgreiche Anzahl von Befruchtungen zu gewährleisten. Durch disruptive Selektion, die beide Extremformen der Keimzellengröße selektieren, kann dieses Problem gelöst werden.

Durch die disruptive Selektion wurden einige Keimzellen kleiner und zahlreicher und tauschten die große Menge an Ressourcen gegen den Vorteil von Geschwindigkeit und Quantität ein, während andere Keimzellen größer wurden und zahlenmäßig abnahmen und das Potenzial für Geschwindigkeit und Anzahl gegen den Vorteil von Größe und Robustheit eintauschten.

Schließlich fanden sich einige unglückliche Keimzellen in der Mitte wieder: Sie hatten weder die maximale Geschwindigkeit und Zahl noch die maximale Größe und Robustheit. Sie waren den beiden Extremformen der Keimzellen im Nachteil und starben bald aus und an ihre Stelle traten die beiden optimalsten Größen.

Dieses System mit zwei Keimzellen unterschiedlicher Größe und Form und ungleichem Ressourcenbeitrag der beiden Elternteile zur Zygote wird als Anisogamie (aniso = ungleich; gamos = Ehe) bezeichnet. Nachdem sich die Keimzellen durch disruptive Selektion in zwei extrem unterschiedliche Größen aufgeteilt haben, ist es nahezu unmöglich, dies rückgängig zu machen. Eine Umkehrung dieser Entwicklung würde außergewöhnliche Umstände erfordern, z. B. eine Umkehrung der Komplexität des Organismus.

Daher ist die Entwicklung der Keimzellen zu zwei verschiedenen Größen und Formen meist eine Einbahnstraße, und aufgrund der reproduktiven Optimalität - dem Ausgleich der Nachteile der beiden Keimzellentypen durch die Divergenz zu beiden Extremen - ist die Anisogamie zum vorherrschenden System der sexuellen Fortpflanzung im Pflanzen- und Tierreich geworden.

Die Entwicklung der Keimzellen in zwei Extreme und die anschließende Entstehung von zwei Geschlechtern ist so optimal für die sexuelle Fortpflanzung, dass sich die Dichotomie männlich-weiblich unabhängig in fast allen Linien mehrzelliger Organismen entwickelt hat. Evolutionsbiologen betonen sogar, dass die Divergenz in zwei Geschlechter eine fast unvermeidliche Folge der sexuellen Fortpflanzung ist.

Neben der disruptiven Selektion gibt es vielleicht noch eine weitere, tiefergehende Ursache für die Unterschiede in der Keimzellengröße und das hat mit den Mitochondrien zu tun. Mitochondrien haben ihr eigenes Genom und damit entsteht ein Konfliktpotential da das Genom der Mitochondrien ein anderes evolutionäres Interesse hat als das Genom des Wirtes. Natürlich haben Mitochondrien kein Bewusstsein und sie können daher auch keine aktiven Interessen haben. Gemeint ist, dass sie unter bestimmten Bedingungen einen anderen Selektionsvorteil haben können als ihre Wirtszellen, so dass die evolutionären Optimierungen konträr verlaufen könnten. „Evolutionäres Interesse“ ist daher eine vereinfachte Formulierung, um bestimmte Sachverhalte verständlicher zu machen und wird in dieser Form unter Evolutionsbiologen regelmäßig genutzt.

Bei der sexuellen Reproduktion kommt es zur Mischung von Genen beider Elternteile. Dies kann zu Konflikten zwischen verschiedenen Genvarianten innerhalb desselben Organismus führen, was sich durch die Verschmelzung zweier Keimzellen widerspiegelt, aber z. B. auch durch das Vorhandensein von Kerngenom und Mitochondriengenom in einer Zelle.

Die evolutionäre Lösung dieses Konflikts zweier unterschiedlicher Genome, war die Einschränkung der Rekombinationsmöglichkeiten der Mitochondrien durch uniparentale Vererbung. Wenn nur eines der beiden Keimzellen die Organellen weitergibt, fällt für die Organellen der Vorteil von Rekombination zwischen den Linien weg.

Damit unterliegen sie zwar dem Problem der Mullerschen Ratsche, aber da sie immer in mehrfachen Kopien innerhalb der eukaryontischen Zellen vorliegen, können sie dieses Problem durch DNA-Austausch innerhalb der Zelllinien umgehen.

Dieser Urkonflikt innerhalb der eukaryontischen Zellen ist wahrscheinlich der Ausgangspunkt für die zunehmende Spezialisierung der beiden Keimzellentypen, ausgehend von isogamen Vorläufern. Die weiblichen Keimzellen geben die Mitochondrien an die Nachkommen weiter und verhindern gleichzeitig das Eindringen von Mitochondrien, die von den Spermien mitgebracht werden. Um das zu erreichen, sind komplizierte Gensysteme notwendig, die ebenfalls erst evolvieren mussten. Das System ist auch nicht perfekt – gelegentlich kommt es immer noch zum Eindringen von Mitochondrien über die Spermien, die dann die mütterlichen Mitochondrien verdrängen können, was insbesondere bei den isogamen Algen öfter vorkommt.

Also – sexuelle Vermehrung ist nicht unbedingt effizient, aber sie ist kreativ.

Sie bringt Vielfalt, eröffnet evolutionäre Spielräume und hat den Weg bereitet für etwas ganz Großes: Vielzelligkeit.

Denn sobald Zellen anfangen, sich zu spezialisieren und zusammenzuarbeiten, wird es richtig spannend – mit ersten Geweben, echten Körpern und völlig neuen Formen des Lebens.

Im nächsten Video schauen wir uns an, wie aus einzelnen Zellen komplexe Organismen wurden, was Choanoflagellaten mit uns zu tun haben – und warum du ohne Kooperation auf Zellebene heute kein Gehirn, keinen Darm und keinen schlechten Haartag hättest.

Bis dahin: Abo dalassen, Video liken, und wie immer: Bleib neugierig – die Evolution ist noch nicht am Ende!