

SONDERDRUCK

aus

4 | 2024



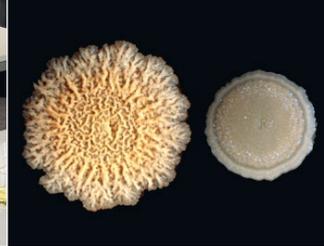
Verband | Biologie, Biowissenschaften & Biomedizin in Deutschland



ZOOLOGIE
Fortpflanzung
an Land



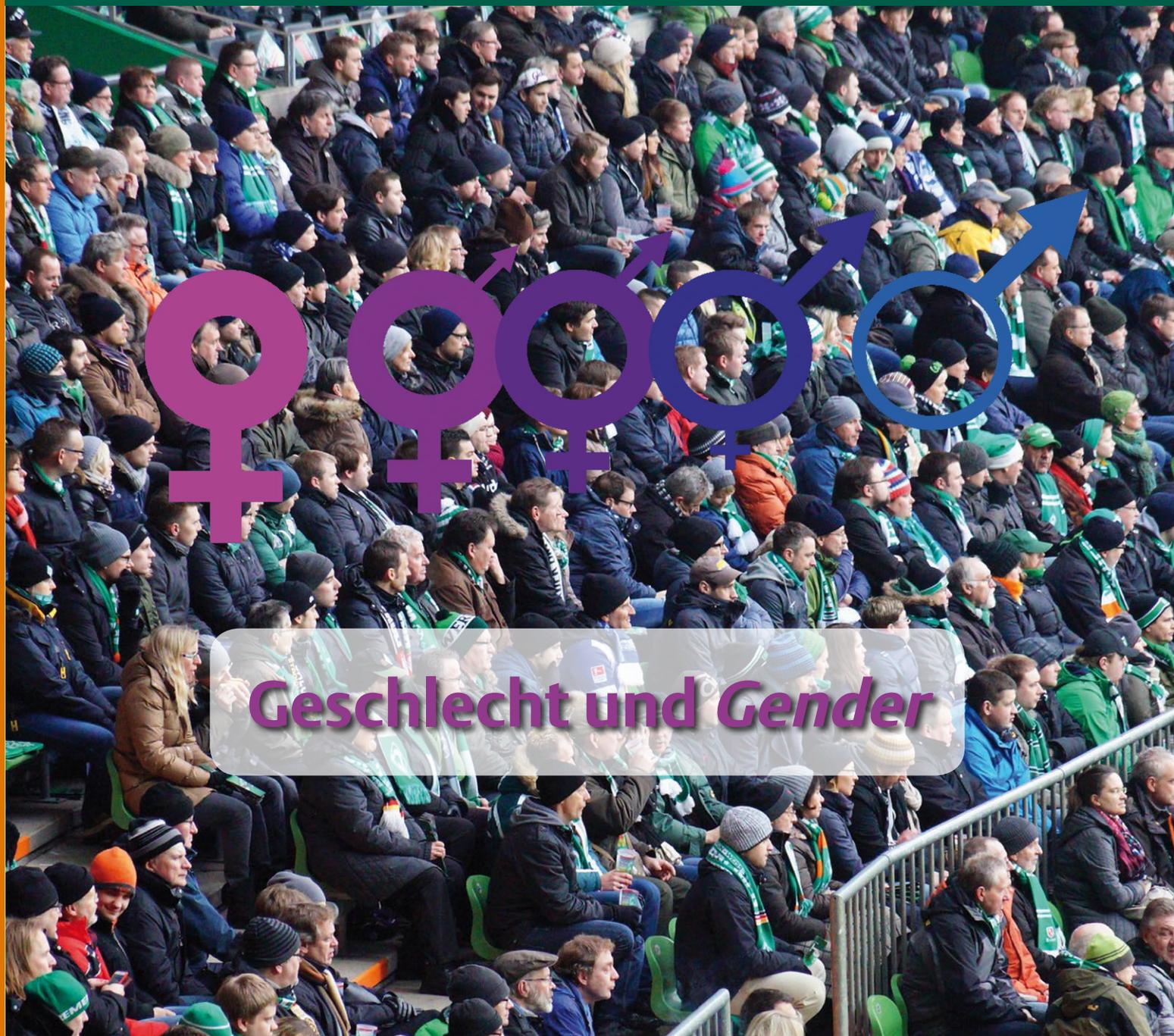
SCHULE
Experimente
im Abitur



MIKROBIOLOGIE
Das Modellsystem
Bacillus subtilis

BIOLOGIE

IN UNSERER ZEIT



Geschlecht und Gender

Eine kategoriale Geschlechtszuordnung wird der Variabilität der Individuen nicht gerecht

Weiblich – männlich – divers: Ist es so einfach?

DIETHARD TAUTZ

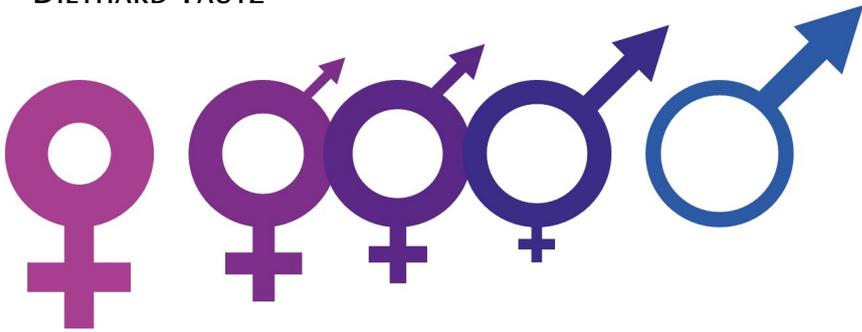


Abb.: P. Eitner.

Die evolutionsbiologische Funktion von sexueller Vermehrung ist die Erzeugung genetisch unterschiedlicher Individuen. Dadurch entsteht ein Spektrum an Phänotypen und Verhaltensweisen der Geschlechter, das man nicht kategorisieren sollte. Die Diskussion um Geschlechtsidentitäten sollte die Variabilität in den Mittelpunkt stellen, nicht die Binärität. Dann lassen sich biologische und soziologische Standpunkte auch in Einklang bringen.

Sexuelle Vermehrung ist im Tier- und Pflanzenreich weit verbreitet. Max Delbrück erhob 1949 diese Beobachtung aus Sicht eines Physikers zu einer der Grundfesten der Biologie: „In der Geschichte der Biologie sind Entdeckungen von großer Allgemeingültigkeit zu finden, wie die des Vorkommens der sexuellen Fortpflanzung in allen lebenden Formen und der zellulären Struktur der Organismen“ [1]. Zweifellos dachte er dabei an eine binäre Sexualität mit männlichen und weiblichen Individuen. In einer biologischen Definition kann man diese beiden Geschlechter über ihren binären Gametenstatus bestimmen (s. auch den Artikel „Geschlecht und Gender: Eine biologische Perspektive“ in dieser Biuz-Ausgabe). Die Ausprägung des Geschlechts kann allerdings sehr variabel sein, so dass sie mit rein binären Kategorien nicht zu

beschreiben ist. Diese Einsicht hat sich nur langsam durchgesetzt, aber jetzt trägt ihr auch der Gesetzgeber Rechnung.

Zum 1. November dieses Jahres (2024) ist das Selbstbestimmungsgesetz [2] in Kraft getreten. Es ermöglicht jeder Person, den Geschlechtseintrag und den Vornamen im Personenstandsregister zu ändern, ohne dafür ein kompliziertes Verfahren durchlaufen zu müssen. Schon seit einigen Jahren erlaubt das Personenstandsregister nicht nur die Kategorien „weiblich“ und „männlich“ einzutragen, sondern als dritte Option auch „divers“. Das Bundesverfassungsgericht hatte 2017 dazu entschieden, dass das allgemeine Persönlichkeitsrecht auch die geschlechtliche Identität derjenigen schützt, die sich weder dem männlichen noch dem weiblichen Geschlecht zuordnen lassen [3].

Einerseits klingt das nach einer progressiven Entwicklung – insbesondere im Vergleich zu früheren Gesetzen, die sich mit Geschlechtsidentitäten befasst haben. Andererseits betont der Gesetzgeber aber damit einmal mehr, dass es eine grundsätzliche Klassifizierbarkeit der Geschlechter gibt – jetzt jedoch mit dem Zugeständnis, dass sich nicht alle Personen unter weiblich oder männlich einordnen lassen.

Aber wird das dem phänotypischen Spektrum der Individuen wirklich gerecht? Und was will man mit der Klassifizierung eigentlich erreichen? Was bedeutet es denn, männlich oder weiblich oder divers zu sein und warum kann man das einfach wechseln? In der aufgeladenen Diskussion um die Kategorien und die Fluidität der Geschlechter sollte man sich nicht einfach auf biologische Definitionen einer grundsätzlichen Zwei-Geschlechtlichkeit zurückziehen und Gender-Diversität als anthropozentrisch interpretieren [4]. Wenn man die Frage aus evolutionsbiologischer und genetischer Sicht betrachtet, wird man feststellen, dass ein Ausgangspunkt, in dem die Variabilität der Individuen im Mittelpunkt steht, einen viel besseren Ansatz zum Verständnis der Geschlechter liefert.

Das Rätsel sexueller Reproduktion

Die Evolutionsbiologie rätselt seit Jahrzehnten, welche populationsgenetischen Mechanismen notwendig sind, um sexueller Reproduktion gegenüber asexueller Repro-

THEORIEN ZUR LÖSUNG DES "TWO-FOLD COST OF SEX"-PROBLEMS

1. Fisher-Muller-Hypothese

Die Hypothese besagt, dass die sexuelle Fortpflanzung eine schnellere Evolution ermöglicht, indem sie vorteilhafte Mutationen von verschiedenen Individuen zusammenführt. In ungeschlechtlichen Populationen müssen vorteilhafte Mutationen nacheinander in derselben Abstammungslinie auftreten, was viel länger dauert. Bei der sexuellen Fortpflanzung können durch Rekombination mehrere vorteilhafte Mutationen in den Nachkommen kombiniert werden, was die allgemeine Anpassungsfähigkeit der Population erhöht. Allerdings ist das nur ein langfristiger Vorteil, der kurzfristige Evolution nicht ausreichend erklären kann.

2. „Muller's ratchet“-Hypothese

Die Hypothese fokussiert darauf, dass die sexuelle Fortpflanzung die Anhäufung von schädlichen Mutationen verhindern kann. In ungeschlechtlichen Populationen können sich Mutationen, die die Fitness verringern, über Generationen hinweg anhäufen, ohne dass es eine Möglichkeit gibt, sie zu eliminieren. Darauf bezieht sich der Begriff „ratchet“ (Ratsche). Jede einzelne Mutation wird als ein Klick in einer Seil-Ratsche gesehen, der nicht mehr zurückgestellt werden kann. Die mit der sexuellen Fortpflanzung einhergehende Rekombination der Chromosomen kann aber eine derartige „Rückstellung“ bewirken. Auch diese Hypothese erklärt also nur die langfristigen Konsequenzen.

3. Red-Queen-Hypothese

Die Hypothese besagt, dass die sexuelle Fortpflanzung vorteilhaft ist, weil sie im evolutionären Konflikt zwischen Parasiten und Wirten die Möglichkeit zur raschen Anpassung erhöht. Da Parasiten und Krankheitserreger auf Grund kurzer Generationszeiten schnell evolvieren können, sorgt die sexuelle Fortpflanzung

der Wirte für eine genetische Vielfalt, um schnell die nötigen Resistenzen zu entwickeln. Der Konflikt endet letztlich nie, da auch die Parasiten weiter evolvieren. Der Begriff „Red-Queen-Hypothese“ lehnt sich an die Figur der Roten Königin in dem Buch „Alice hinter den Spiegeln“ von Lewis Carroll an. Dort erklärt die Rote Königin Alice: „Hierzulande musst Du so schnell rennen, wie Du kannst, wenn Du am gleichen Fleck bleiben willst.“

4. Tangled-Bank-Hypothese

Im Mittelpunkt dieser Hypothese steht die Vorstellung, dass die sexuelle Fortpflanzung eine genetische Vielfalt schafft, die dazu beiträgt, den Wettbewerb zwischen den Nachkommen zu verringern. In Umgebungen mit begrenzten Ressourcen können Geschwister, die sich genetisch unterscheiden, unterschiedliche Nischen oder Ressourcen nutzen, wodurch sich die Überlebenschancen insgesamt erhöhen. Die Bezeichnung tangled bank bezieht sich auf ein Zitat von Darwin in seinem Buch Origin of Species, in dem er die Komplexität eines Ökosystems beschreibt (im Originalzitat benutzt Darwin den synonymen Ausdruck entangled bank).

5. Bet-Hedging-Hypothese

Diese Hypothese besagt, dass die sexuelle Fortpflanzung eine Strategie für Organismen darstellt, die in unvorhersehbaren Umgebungen leben. Durch die Erzeugung genetisch unterschiedlicher Nachkommen erhöht die sexuelle Fortpflanzung die Wahrscheinlichkeit, dass zumindest einige von ihnen unter den sich ändernden Bedingungen überleben. Der Begriff hedging stammt ursprünglich aus der Finanzwelt und beschreibt die Strategie einer Absicherung der Investitionen gegen Risiken.

duktion einen Fitnessvorteil zu verschaffen. Dass für die sexuelle Reproduktion zwei Individuen zusammenkommen müssen, bringt nämlich wesentliche Probleme mit sich. Die Suche nach einem passenden Partner kostet Zeit und Energie, die dann nicht für die Produktion der Nachkommen zur Verfügung steht. Aber noch problematischer ist, dass nur ein Partner Nachkommen produziert und der andere nur die Spermien liefert. Schon allein auf Grund dieses Effekts sollten Spezies, die auf sexuelle Reproduktion verzichten, einen zweifachen Fitnessvorteil haben – weil sie doppelt so viele Nachkommen produzieren können. Dieses Problem wird im Englischen als *two-fold cost of sex* bezeichnet. Seit es von Maynard Smith 1978 in seinem Buch „*The Evolution of Sex*“ [5] thematisiert wurde, sind viele Evolutionsbiologinnen und Evolutionsbiologen inspiriert worden, dafür Erklärungen zu finden. Dementsprechend gibt es viele Theorien dazu (Kasten „Theorien zur Lösung des *“two-fold cost of sex”*-Problems“). Derzeit scheint ein pluralistischer Ansatz am vielversprechendsten, also nicht nur einen einzelnen Faktor zur Erklärung heranzuziehen, sondern ein Zusammenwirken mehrerer Faktoren anzunehmen [6].

Alle diese Theorien haben aber eine gemeinsame Basis: Sie gehen von einer Variabilität zwischen den Individuen aus, auf deren Basis Evolutionsprozesse erst wirken können. Aber diese Variabilität muss erst einmal generiert werden. Sexuelle Reproduktion ist dafür der effizienteste Prozess, da sie in jeder neuen Generation mit einer Rekombination

IN KÜRZE

- Sexuelle Reproduktion ist ein Mechanismus zur **Generierung genetischer Variabilität** als Voraussetzung für evolutionäre Anpassungen.
- Der Phänotyp und das Verhalten der Geschlechter wird durch **polygene Mechanismen** generiert, die durch überlappende Verteilungen und Interaktion mit der Umwelt gekennzeichnet sind.
- Gender-Eigenschaften und sexuelle Fluidität sind Teil und **Ausdruck der genetischen und umweltbedingten Variabilität**.
- Eine Kategorisierung von Geschlechtern **wird der Variabilität der Individuen nicht gerecht**.

der genetischen Varianten der Eltern verbunden ist. Egal welcher Faktor das „*two-fold cost of sex*“-Problem am besten zu erklären mag, so liegt der Schlüssel letztlich in der Variabilität zwischen den Individuen. Die fundamentale Funktion sexueller Vermehrung ist also nicht die reine Erzeugung von Nachkommen (dies wäre durch asexuelle Vermehrung viel effizienter möglich), sondern durch Rekombination Variabilität zwischen den Nachkommen zu generieren. Aber das klingt schon sehr nach Zirkelschluss, wenn man sagt, dass sexuelle Reproduktion nötig ist, um das evolutionäre Problem sexueller Reproduktion zu lösen. Also muss es einen anderen Ausgangspunkt für die Entstehung sexueller Reproduktion geben.

Der Ursprung sexueller Vermehrung

Die Rekombination von genetischem Material war schon vom Anbeginn des Lebens ein entscheidender Faktor der Evolution. Ohne Rekombination, also bei strikt asexueller Zellteilung und Vermehrung, sammeln sich nämlich nachteilige Mutationen in den klonalen Linien an. Da der Mutationsprozess zufällig ist, können diese nicht einfach durch Rück-Mutationen wieder aufgehoben werden. Es ist eben sehr unwahrscheinlich, dass das gleiche Nukleotid im Erbmaterial durch eine erneute Mutation wieder seinen Ausgangszustand einnimmt. Die zunehmende Ansammlung von schädlichen Mutationen würde also zum Aussterben der Linien führen. Dieser Effekt wird heute als „*Muller's ratchet*“ bezeichnet (vgl. Kasten „Theorien zur Lösung des *two-fold cost of sex*-Problems“). Dem Effekt kann nur begegnet werden, wenn zwischen den Linien genetisches Material ausgetauscht wird, das an den betreffenden Stellen im Genom noch keine Mutation trägt. Die Populationen der Linien müssen also eine Möglichkeit finden, sich gegenseitig durch Austausch des Genmaterials zu korrigieren – sonst geht die Evolution gar nicht weiter.

Möglicherweise funktionierte die notwendige Korrektur ursprünglich einfach über die Aufnahme von Erbmaterial aus der Umwelt. Dass insbesondere DNA in der Umwelt auch lange nach dem Tod von Organismen überdauert, ist heute gut bekannt. Und ebenso wissen wir, dass diese DNA von Bakterien aufgenommen und über allgemeine Reparaturmechanismen in das Genom eingebaut werden kann. So kann man bei Bakterien auch ausgefeilte Mechanismen zum genetischen Austausch finden, die aber ohne ein Gametenstadium funktionieren. Nur bei Eukaryonten hat sich eine echte sexuelle Reproduktion mit Reduktions- teilung und Gametenstadien entwickelt.

Tatsächlich ist sexuelle Reproduktion außerordentlich kompliziert. Gameten müssen aus einer abgeleiteten Zellteilung entstehen, da sie nur einen halben Chromosomensatz haben dürfen. Diese als Meiose bezeichnete Form der Zellteilung muss zudem einen Paarungsmechanismus der Chromosomen beinhalten, bei dem es mit Hilfe von Proteinkomplexen zur Rekombination zwischen den elterlichen Chromosomen kommt [7]. Und aus diesen Produkten müssen dann spezialisierte Zellen entstehen, die wie-

der zu einer diploiden Zelle verschmelzen können. Entscheidend ist dabei, dass sie nicht mit sich selbst verschmelzen dürfen, da es ja dann zu keiner Vermischung des Erbmaterials kommen würde. An all diesen Schritten ist eine Vielzahl von Genfunktionen beteiligt, die aufeinander abgestimmt und evolutionär optimiert worden sein müssen. Wie dies im Einzelnen abgelaufen ist, werden wir heute kaum rekonstruieren können. Aber es kann keinen Zweifel geben, dass diese Mechanismen erst am Ende einer langen evolutionären Entwicklung gestanden haben, nicht an deren Anfang. Die damit verbundene erhöhte Effizienz in der Generierung von Variabilität hat dann aber wesentlich zur weiteren Evolution der Mehrzeller beigetragen, so dass dieser Mechanismus der sexuellen Fortpflanzung heute als so dominant erscheint.

Der Unterschied in den Gameten

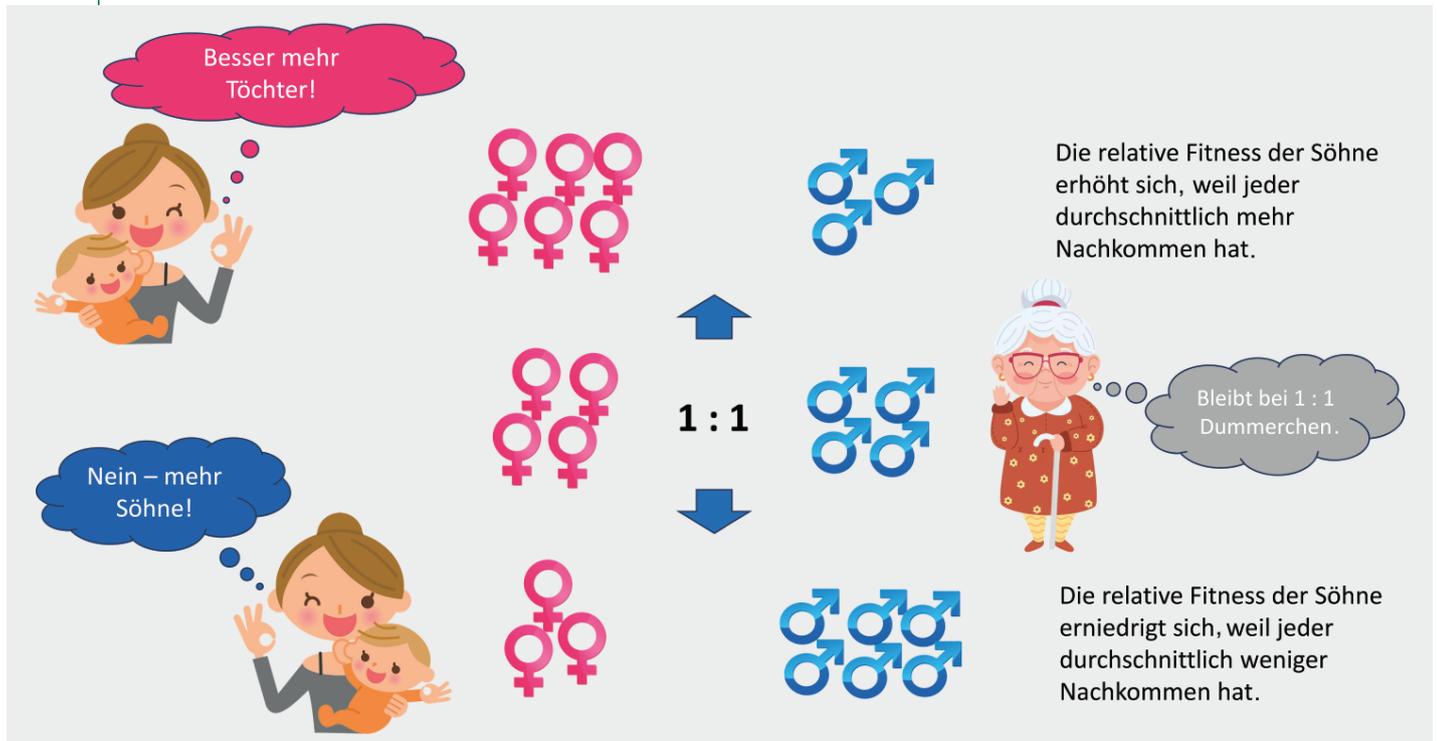
Warum gibt es unterschiedliche Gametentypen, die biologisch als männlich und weiblich bezeichnet werden können? Bei vielen Einzellern (z. B. bei der Alge *Chlamydomonas*, bei Hefepilzen, Paramecien oder Ciliaten) und einigen mehrzelligen Braunalgen (z. B. *Ectocarpus*) unterscheiden sich die Gameten nicht morphologisch – man nennt sie dann isogam. Allerdings kann man sie nach Paarungstypen unterscheiden (z. B. „plus“ und „minus“).

Aber warum haben sich dann in vielen anderen Spezies unterschiedliche Gametentypen entwickelt? Ein entscheidender Faktor liegt wahrscheinlich in der Evolution der eukaryontischen Zelle selbst begründet. Eukaryonten haben bakterielle Zellen als Organellen (u. a. Mitochondrien und Chloroplasten) in die Zelle mit aufgenommen. Diese Organellen haben ihr eigenes evolvierendes Genom. Damit entsteht ein Konfliktpotenzial innerhalb der eukaryontischen Zelle – die Organellen könnten andere evolutionäre „Interessen“¹ haben als das Kerngenom. Die evolutionäre Lösung dazu war die Einschränkung der Rekombinationsmöglichkeiten der Organellen durch uniparentale Vererbung. Wenn nur eines der beiden Gameten die Organellen weitergibt, fällt für die Organellen der Vorteil von Rekombination zwischen den Linien weg. Damit unterliegen sie zwar dem „*Muller's ratchet*“-Problem, 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 Gametentypen, ausgehend von isogamen Vorläufern [8]. Die als weiblich

¹ Natürlich haben Organellen 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. Hier (und an anderen Stellen im Text) wird aber im Sinne der Lesbarkeit eine vereinfachte Formulierung verwendet, die in dieser Form unter Evolutionsbiologen regelmäßig genutzt wird.

ABB. 1 | EVOLUTIONÄRER KONFLIKT IM ZUSAMMENHANG MIT SEXUELLER VERMEHRUNG



Die Abbildung sollte von oben nach unten und dann von links nach rechts betrachtet werden. Weitere Erläuterungen im Text. Pictogramme: open source von <https://freepngimg.com> und <https://de.freepik.com/>

bezeichneten Gameten (Eier) geben die Organellen (bei Tieren die Mitochondrien) an die Nachkommen weiter und verhindern gleichzeitig das Eindringen von Mitochondrien, die von den männlichen Gameten (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 [9].

Die scheinbar klare evolutionäre Rollenverteilung in weiblich und männlich, die durch die Gameten bedingt zu sein scheint, ist damit letztlich ein Überbleibsel der Entstehungsgeschichte eukaryontischer Zellen. Bei der Ausformung der beiden unterschiedlichen Gametentypen in anisogamen Systemen können dann auch zusätzlich noch disruptive Selektionsprozesse eine Rolle gespielt haben [8]. Aus der ursprünglichen Notwendigkeit, Rekombination zwischen evolutionären Linien sicherzustellen, ist ein sehr komplexes System mit zwei Geschlechtern entstanden.

Der Konflikt der Geschlechter

Die Existenz von zwei Geschlechtern ist evolutionär gesehen kein optimaler Zustand. Damit wurde zwar die Generierung von genetischer Variabilität optimiert, aber es

entstanden auch viele neue evolutionäre Konflikte, die bis heute kontinuierlich weitere Evolutionsschritte nach sich ziehen. Dies führt dazu, dass es rund um die Sexualität eine sehr große evolutionäre Fluidität gibt, in der für verschiedene Spezies immer wieder neue Lösungen gefunden werden. Insbesondere ist es nicht möglich, „natürliche“ evolutionäre Rollenverteilungen von Geschlechtern zu definieren, da das einzig Natürliche daran ist, dass sie sich evolutionär ständig verändern.

Einer der offensichtlichsten evolutionären Konflikte ist die normalerweise hälftige Verteilung der Geschlechter in den Populationen der meisten Spezies, inklusive dem Menschen. Wenn es schon nötig ist, zwei Geschlechter zu haben, wäre es doch eigentlich sinnvoll, dass das weibliche Geschlecht, das die Nachkommen produziert, häufiger sein sollte als das männliche Geschlecht, das nur die Spermien beisteuert (Abbildung 1). Männchen nehmen ja letztlich den Weibchen nur die ökologischen Ressourcen weg, die sie brauchen, um die Nachkommen aufzuziehen. Tatsächlich gibt es in vielen Spezies Dominanzhierarchien, in denen Männchen versuchen, im direkten Kampf mit anderen Männchen den Zugang zu Weibchen zu monopolisieren, d. h. viele der Männchen in der Population haben gar keine Nachkommen. Aber das führt dazu, dass erfolgreiche Männchen einen besonderen Fitnessvorteil haben. Für Weibchen „lohnt“ es sich daher, mehr Söhne zu produzieren, da unter ihnen auch einer sein kann, der

diesen hohen Fitnessvorteil hat. Das würde aber zu einem Überschuss an Männchen führen und der potenzielle Fitnessvorteil würde zunehmend verschwinden, da die Konkurrenz immer größer wird. Das gleiche Argument gilt im Übrigen auch, wenn es keine Dominanzhierarchie gibt, also z. B. bei Spezies mit Paarbindungen. Sobald es zu einer Verschiebung des Geschlechterverhältnisses kommt, verändert sich die relative Fitness des häufigeren Geschlechts und das System geht wieder zu einem 1:1-Verhältnis zurück [10].

Die „dauerhafte“ Lösung eines solchen evolutionären Konflikts (in diesem Fall die kontinuierliche Hin- und Herbewegung des Geschlechterverhältnisses unter den Nachkommen) liegt also nicht in einer einzelnen endgültigen Lösung, sondern in einem kontinuierlichen Prozess, der immer wieder ablaufen muss. Solche evolutionären Konflikte spielen sich auf vielen Ebenen ab, insbesondere zwischen den Geschlechtern (Kasten „Evolutionäre Konflikte der sexuellen Reproduktion“), aber auch z. B. in der Ko-Evolution von Wirten und Parasiten. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass eine kontinuierliche Evolution der zu Grunde liegenden genetischen Mechanismen notwendig ist, um im Bereich des Optimalzustands zu bleiben (s. „Red-Queen“-Hypothese in Kasten „Theorien zur Lösung des *two-fold cost of sex*“-Problems“). Und genau dafür muss die genetische Variabilität zwischen den Individuen immer wieder neu gesichert werden.

Der phänotypische Unterschied

Sehen wir uns doch mal die phänotypischen Unterschiede zwischen den Geschlechtern und innerhalb der Geschlechter an – bleiben wir dabei beim Menschen, denn das können wir am besten intuitiv beurteilen. Wenn man jemand auf der Straße trifft, kann man meistens eine Einteilung in Frau oder Mann machen. Aber ebenso kann man meistens auch entscheiden, ob man die Person kennt oder nicht. Denn abgesehen von eineiigen Zwillingen sind keine zwei Individuen gleich. Das ist ja gerade die Funktion sexueller Rekombination: Es sollen Phänotyp-Verteilungen entstehen, nicht identische Individuen – also auch nicht Individuen, die nur in zwei Klassen eingeteilt werden können. Unser Gehirn macht also eine eigentlich schizophrene Entscheidung: Es klassifiziert binär auf Grund einer Kategorisierung, erkennt aber auch gleichzeitig, dass der Phänotyp der Individuen sehr variabel ist.

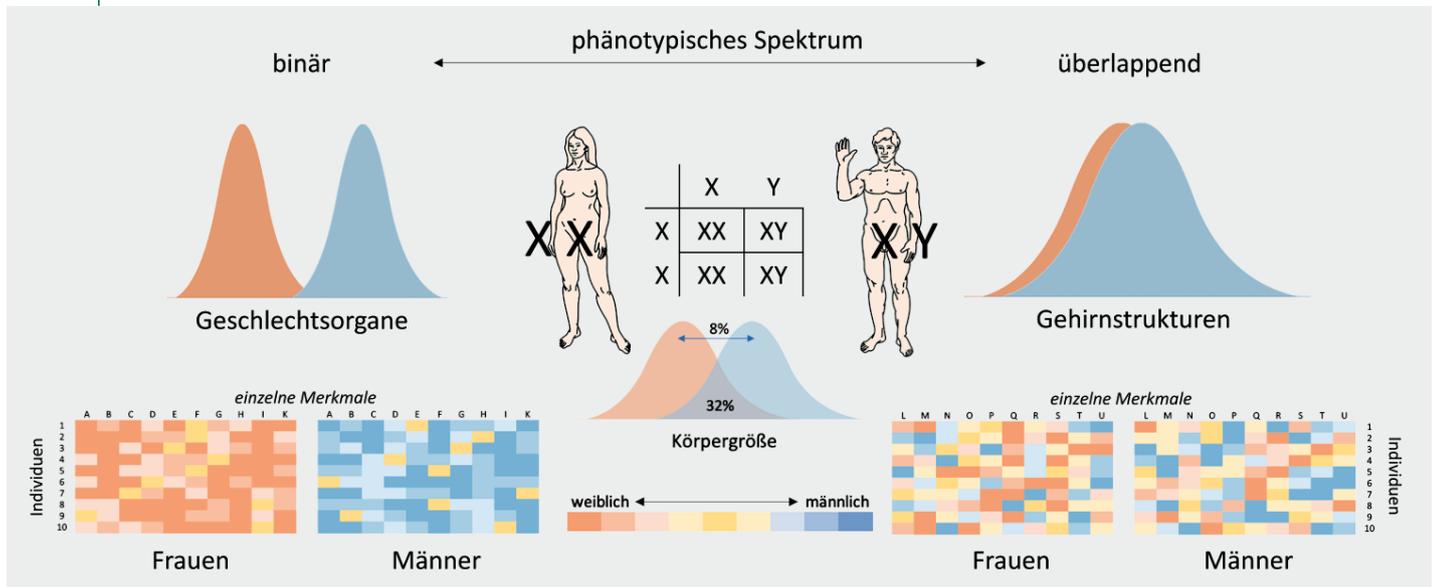
Der Begriff Phänotyp kann sehr viel umfassen. Dazu gehört die Morphologie, in Bezug auf die Geschlechter die Ausbildung der primären und sekundären Geschlechtsmerkmale, aber auch alle anderen Aspekte der äußeren Erscheinung eines Individuums. Dazu zählen die Physiologie, also die körperliche Leistungsfähigkeit, der Hormonhaushalt, die Nahrungsverwertung sowie das Immunsystem und schließlich das Verhalten – für die Geschlechter vor allem das Sexualverhalten, aber auch alle anderen soziobiologisch relevanten Aspekte des Verhaltens, wie etwa das Verhalten, das auf erlernten kulturellen Prägungen basiert.

Der Phänotyp von Individuen entsteht aus einer Kaskade genetisch gesteuerter entwicklungsbiologischer Prozesse. Bei Säugetieren, inklusive des Menschen, führt die Normalentwicklung nach der Fusion der Gameten zu einem weiblichen Phänotyp. Erst in dem Stadium, in dem sich im Embryo die Gonaden ausbilden (beim Menschen in der 6. bis 7. Schwangerschaftswoche) wird ein Gen auf dem männlichen Geschlechtschromosom (Y-Chromosom) aktiv, um auf einen männlichen Phänotyp umzuschalten. Dies ist bei den meisten Säugetieren das sogenannte SRY-Gen (*sex region on the Y*). Wenn dieses Gen einen Defekt hat, dann entwickelt sich der Körper weiblich, auch bei Individuen mit einem Y-Chromosom. SRY kodiert für einen Transkriptionsfaktor der SOX-Klasse. Dieser bindet an die DNA und löst damit eine Kaskade von regulatorischen Prozessen aus, die zur Entwicklung von Hoden und über deren Hormonproduktion zum männlichen Phänotyp führen. SRY kann daher als binärer Schalter angesehen werden. Seine Aktivität ist mit dem Y-Chromosom verbunden und wird daher nach den Mendelschen Regeln vererbt (Abbildung 2). Genau genommen ist diese Umschaltung die einzige echt binäre Lebensphase der Individuen. Man könnte „männlich“ und „weiblich“ daher auch unabhängig von den Gameten als SRY⁺ und SRY⁻ definieren (allerding gibt es bei anderen Spezies auch andere solche Schaltergene). Alle weiteren genetischen Prozesse, die zur Ausformung des Phänotyps führen, sind nicht mehr binär, sondern unterliegen den Regeln der polygenen Vererbung.

Polygene Vererbung unterscheidet sich in wichtigen Aspekten von Mendelscher Vererbung. Statt kategorischer Phänotypen entstehen dabei phänotypische Verteilungen (Abbildung 2). Wenn ein Phänotyp unter Selektion steht, verschieben sich die Mittelwerte der Verteilungen. Da die Geschlechter ja divergierenden Selektionsdrücken unterliegen, bedeutet dies, dass sie sich in den Mittelwerten von zwei Verteilungen unterscheiden, einer männlichen und einer weiblichen. Am einfachsten kann man das an der Körpergröße erkennen. Beim Menschen sind Männer im Durchschnitt acht Prozent größer als Frauen, aber die beiden Verteilungen überlappen sich zu 32 Prozent. Statistisch besagen solche Überlappungen, dass das Geschlecht einen Teil der Daten erklärt, aber eben nicht den Unterschied der Geschlechter an sich ausmacht [11].

Je nach Breite des Überlappungsbereichs kann man für ein gegebenes Individuum aus der Betrachtung eines einzelnen phänotypischen Merkmals nicht ohne weiteres erschließen, ob es sich um eine Frau oder einen Mann handelt. Am ehesten geht dies natürlich an Hand der primären Geschlechtsorgane. Da wird man für die meisten Individuen von der äußeren Erscheinung auf den Gamentyp schließen können. Allerdings sind auch auf dieser Ebene Variationen und Überlappungen gut bekannt. So unterscheidet schon der chinesische Arzt Li Shizhen (1518–1593) in der seinerzeit weltweit umfangreichsten Enzyklopädie zur Natur- und Heilkunde *Ben cao gang mu*

ABB. 2 | ÜBERLAPPENDE VERTEILUNG UND MOSAIKSTRUKTUR DER GESCHLECHTSPHÄNOTYPEN



Im Zentrum der Abbildung steht die chromosomale Geschlechtsbestimmung auf der Basis der X- und Y-Chromosomen, die nach den Mendelschen Regeln vererbt werden und zu binären Genotypen führen (XX und XY). Alle weiteren phänotypischen Charaktere werden aber durch polygene Vererbungsprozesse bestimmt. Diese sind durch Varianz zwischen den Individuen mit überlappenden Verteilungen gekennzeichnet. Als binär können diese gesehen werden, wenn sie nur in einem kleinen Bereich überlappen, so wie es für die Geschlechtsorgane der Fall ist (links). Auf der anderen Seite stehen die Gehirnstrukturen (nicht die Größe des Gehirns), bei denen die Überlappung fast vollständig ist (rechts). Dazwischen können alle möglichen Übergangsformen mit unterschiedlicher Überlappung liegen [11] – hier als Beispiel die Körpergröße. Im unteren Bereich der Abbildung ist die Mosaikstruktur der Individuen dargestellt. Hier werden symbolisch von links nach rechts zehn Merkmale dargestellt, die bei beiden Geschlechtern vorkommen, aber eher weiblich oder eher männlich ausfallen können (durch das Farbcode-Spektrum symbolisiert). Von oben nach unten sind zehn Individuen mit ihren kombinatorischen Mustern an Merkmalen dargestellt. Im binären Fall (links) wird allein durch den Farbcode eine Trennung sehr deutlich. Aber auch hier können selbst die geschlechtsgleichen Individuen aus einem Mosaik verschiedener Varianten bestehen. Im überlappenden Fall (rechts) ist die Mosaikzusammensetzung so komplex, dass für das einzelne Individuum die systematischen Unterschiede fast vollständig wegfallen.

von 1593 nicht nur Männer und Frauen, sondern je fünf weitere Typen, insbesondere unter den zusätzlichen männlichen Typen auch einen Typen, bei dem der Körper sowohl männlich als auch weiblich ist [12].

Bei den sekundären Geschlechtsmerkmalen – wie etwa der Ausprägung der Brust oder dem Umfang von Taille und Becken – wird die systematische Unterscheidbarkeit von Männern und Frauen schon weniger deutlich. Und bei der Ausprägung des Phänotyps des Gehirns gibt es fast keine Unterschiede mehr (Abbildung 2).

Die Mosaikstruktur der Geschlechter

Um die Geschlechtsunterschiede im Gehirn – und damit implizit im Verhalten – gibt es besonders viele Kontroversen. Das Gehirn von Frauen ist durchschnittlich acht Prozent kleiner als das der Männer. Aus diesem Umstand hat man zu Viktorianischen Zeiten geschlossen, dass Männer den Frauen von Natur aus überlegen sind. Auch ein ansonsten so kritischer Denker wie Darwin hat sich diesem Urteil angeschlossen. In dem Buch „Die Abstammung des Menschen und Selektion in Bezug auf Sex“ [13] schreibt er: „Der Hauptunterschied in den intellektuellen Kräften der beiden Geschlechter zeigt sich darin, dass der Mann in allem, was er sich vornimmt, eine höhere Stellung ein-

nimmt als die Frau, wenn es darum geht, tiefes Denken, Vernunft oder Vorstellungskraft anzuwenden, oder auch nur seine Sinne und seine Hand zu nutzen.“ Auch Darwin war also nicht frei von den Einflüssen seiner Zeit, obwohl er mit etwas Recherche ohne weiteres auch damals bereits zu einer anderen Ansicht hätte kommen können.

Da die durchschnittliche Körpergröße von Frauen acht Prozent unter der von Männern liegt, ist es eigentlich trivial, dass auch die durchschnittliche Gehirngröße acht Prozent niedriger ist. Relevant ist nur die Relation von Gehirngröße und Körpergröße – und da gibt es keine Unterschiede. Nachdem das klar war, hat man lange versucht, strukturelle Unterschiede in den Gehirnen zwischen Männern und Frauen zu finden. Es wurden dann auch immer wieder einzelne Regionen identifiziert, die kleine Durchschnittsunterschiede zu zeigen scheinen. Aber erst spät hat man sich die Frage gestellt, ob es denn einen systematischen binären Unterschied gibt. Dieser würde existieren, wenn die verschiedenen Regionen, die die Durchschnittsunterschiede zeigen, in ihrem Unterschied jeweils die weibliche Variante bei Frauen und die männliche Variante bei Männern aufweisen würden. Genau dies ist aber nicht der Fall. Stattdessen sind die männlichen und weiblichen Gehirne aus einem Mosaik aus männlichen

und weiblichen Varianten aufgebaut (Abbildung 2) [14]. Es scheint, dass jede Person eine andere Kombination der Varianten hat. Die gemittelten phänotypischen Verteilungen überlappen sich daher im Gehirn besonders stark (Abbildung 2).

Trotzdem kann es bei einigen Männern ein leichtes Übergewicht männlicher Varianten und bei einigen Frauen ein leichtes Übergewicht von weiblichen Varianten geben. Je nach statistischem Ansatz kann man daher mit einer gewissen Sicherheit aus den Gehirnstrukturen erschließen, ob es sich um eine Frau oder einen Mann handelt. Aber für einzelne Individuen ist die individuelle Kombination von Varianten viel wichtiger als eine allgemeine Geschlechtseinteilung [14].

EVOLUTIONÄRE KONFLIKTE DER SEXUELLEN REPRODUKTION

Die sexuelle Reproduktion führt zu einer Reihe evolutionärer Konflikte, die das Ergebnis unterschiedlicher Interessen von Individuen, Geschlechtern oder Genen sein können. Zu den wichtigsten evolutionären Konflikten gehören:

1. Sexueller Konflikt:

Männchen und Weibchen können unterschiedliche Strategien zur Maximierung ihrer Fortpflanzungserfolge entwickeln. Männchen können Strategien entwickeln, um ihre Chancen auf Paarung zu erhöhen, während Weibchen Strategien entwickeln, um die Kontrolle über die Partnerwahl zu behalten. Dies führt zu einem „Wettrüsten“ zwischen den Geschlechtern, wobei jedes Geschlecht versucht, die Kontrolle über den Fortpflanzungserfolg zu maximieren.

2. Ressourcenkonflikt zwischen den Geschlechtern:

In vielen Arten investieren Weibchen mehr in die Nachkommen (z. B. durch Schwangerschaft, Eiablage oder Brutpflege), während Männchen oft in die Erzeugung möglichst vieler Nachkommen investieren. Dies kann zu Konflikten führen, bei denen Männchen versuchen, Weibchen zur Paarung zu zwingen oder Weibchen versuchen, die Zahl der Nachkommen zu kontrollieren, um ihre eigenen Ressourcen optimal zu nutzen.

3. Konflikt innerhalb der Geschlechter:

Auch innerhalb eines Geschlechts kann es zu Konflikten kommen. Zum Beispiel können Männchen einer Art in Konkurrenz stehen, um Zugang zu Weibchen zu erhalten, was zur Evolution von Strukturen führen kann, die dazu dienen, diesen Kampf zu gewinnen (z. B. Geweihe bei Hirschen). Weibchen können ebenfalls in Konkurrenz stehen, insbesondere wenn die Ressourcen für die Aufzucht von Nachkommen knapp sind.

4. Genetischer Konflikt:

Bei der sexuellen Reproduktion kommt es zur Mischung von Genen beider Elternteile. Dies kann zu Konflikten zwischen verschiedenen Genvarianten innerhalb desselben Organismus führen, insbesondere wenn die Varianten von Mutter und Vater unterschiedliche „Interessen“ haben. Ein Beispiel ist der Konflikt zwischen mitochondrien- und kernkodierten Genen. Ein weiteres Beispiel ist das imprinting von Genen, wobei durch epigenetische Modifikation in den Gameten festgelegt wird, ob nur die mütterliche oder nur die väterliche Variante des betreffenden Gens in den Nachkommen exprimiert wird. Imprinting wird oft auch als Lösung des Ressourcenkonflikts (s. o.) interpretiert, da z. B. bei Säugetieren die Ausbildung der Plazenta durch solche Genysteme kontrolliert wird.

Der genetische Unterschied

Auf Grund der evolutionären Konflikte um die sexuelle Reproduktion gehören die genetischen Mechanismen der Geschlechtsbestimmung und die Ausformung des Geschlechtsphänotyps zu den besonders schnell evolvierenden genetischen Systemen. Das Chromosom, das nur in einem Geschlecht vorkommt (beim Menschen das Y-Chromosom), unterliegt dem „Muller's ratchet“-Effekt und verliert daher mit der Zeit die Gene, die auf ihm kodiert sind. Die meisten Gene, die für die Ausbildung der Geschlechtsunterschiede relevant sind, sind daher nicht auf den Geschlechtschromosomen, sondern auf den Autosomen zu finden. Sie werden in weiblichen und männlichen Individuen unterschiedlich exprimiert, um ihre spezifischen Funktionen bei der Ausbildung des Geschlechtsphänotyps zu erfüllen. Man spricht dabei von *sex-biased expression* (*SB*-Gene) und je nach Organ können einige hundert bis einige tausend Gene so eine differentielle Expression zeigen. Nur sehr wenige Gene sind ausschließlich in einem Geschlecht aktiv, die meisten unterscheiden sich nur in der relativen Expression. Sie sind nicht nur in Geschlechtsorganen aktiv, sondern in praktisch allen Organen und Geweben des Körpers. Diese unterschiedlichen Expressionen lassen sich mittels genomweiten Transkriptionsanalysen heute sehr gut messen und evolutionär vergleichen.

In einer vergleichenden Studie zwischen verschiedenen Säugetieren zeigte sich, dass die geschlechtsspezifische Expression in den verschiedenen Organen und Spezies unterschiedlich ausgeprägt ist. Jedes Organ und jeder Zelltyp haben ihr eigenes Muster von *SB*-Genen [15]. Das Mosaik-Prinzip, das in der Gehirnmorphologie gefunden wurde, zeigt sich also auch für alle Organe auf der Ebene der Genexpression.

Interessanterweise evolviert die geschlechtsspezifische Expression schnell über die Arten hinweg. Selbst zwischen nah verwandten Mausarten zeigen nur weniger als fünf Prozent der *SB*-Gene in den verschiedenen Organen eine konservierte *SB*-Expression [16]. Ein solches schnell evolvierendes Muster mit tausenden von beteiligten Genen ist nur mit einem polygenen Vererbungsmodell vereinbar, bei dem die Rolle einzelner Gene bei der Ausprägung eines Phänotyps leicht durch andere Gene ersetzt werden kann.

Wenn man sich die individuelle Variabilität der Expression der *SB*-Gene ansieht, dann kann man auch hier oft überlappende Verteilungen sehen [16] – ähnlich wie im Phänotyp. Die einfache Annahme einer männlich-weiblichen Binärität ist also auch auf der Ebene der Genexpression nicht gegeben. Insbesondere kann man nicht von drei Kategorien – männlich, weiblich, divers – sprechen.

Die Rolle der Umwelt

Polygene Vererbungsmechanismen beinhalten immer eine genetische und eine „Umwelt“-Komponente. Letztere be-

schreibt formal nur den Anteil an der Variation zwischen Individuen, der nicht auf genetische Faktoren zurückgeführt werden kann. Was diese „Umwelt“-Komponente genau ist, kann man in der Regel nicht sagen. Es können die allgemeinen Umweltbedingungen wie etwa Temperatur und Ernährung sein, es können aber auch epigenetische Effekte sein (z. B. Methylierung an DNA, Histonen oder RNA, alternatives *splicing* oder microRNA-Konzentrationen), aber auch ein erlernter oder kultureller Einfluss – insbesondere bei Verhaltensweisen. Die genetische Komponente polygener Vererbung wird als „Heritabilität“ bezeichnet. Die Messung der Heritabilität hängt von den experimentellen Bedingungen ab. Wenn die Umweltbedingungen möglichst konstant gehalten werden, dann ergeben sich hohe Heritabilitätswerte für die meisten phänotypischen Charaktere. Wenn die Umwelt sehr variabel ist, dann reduziert sich der Anteil der Heritabilität. Beim Menschen wird die Umwelt in der Regel sehr variabel sein; die Ausprägung der phänotypischen Varianz wird dadurch größer, die relative Rolle der genetischen Varianz wird kleiner. Das gilt natürlich auch für die Varianz zwischen den Geschlechtsphänotypen und dem sexuellen Verhalten. Ein starker kultureller Einfluss auf diese Teile des Phänotyps ist daher erwartbar, aber es wird immer auch gleichzeitig eine genetische Komponente geben, die in unterschiedlichen Individuen unterschiedlich stark ausgeprägt sein kann.

In Bezug auf Verhaltensunterschiede beim Menschen kann man auch wieder auf das Buch von Li Shizhen (s. o.) zurückkommen. Dort werden drei Verhaltensgruppen mit von der Norm abweichendem Verhalten unterschieden. Diejenigen, die sich wie Männer verhalten sollen, aber wie Frauen handeln. Diejenigen, die sich wie Frauen verhalten sollen, sich aber wie Männer verhalten. Und diejenigen, die in der einen Monatshälfte Yin/Weibchen und in der anderen Monatshälfte Yang/Männchen sind. Fluidität im Geschlechtsverhalten gab es beim Menschen also schon immer.

Die Falle der Kategorien

Wenn man die genetische und die Umwelt-bedingte Variabilität betrachtet, dann wird eine einfache binäre Kategorisierung in männlich und weiblich der phänotypischen Realität der Individuen nicht gerecht. Dies ist Sexualforscher und Psychologen schon lange bekannt, weshalb als Hilfskonstrukt die Bezeichnung *Gender* für die gefühlte und/oder soziale Geschlechtsidentität eingeführt wurde, die der biologischen Geschlechtsbestimmung gegenübergestellt wird. Allerdings gibt es dabei eine Tendenz, die biologische Geschlechtsbestimmung separat von Gendereigenschaften zu betrachten. Das eine gilt als binär und biologisch, das andere als rein kulturell entwickelt. Aber auch das ist letztlich eine ungeeignete Kategorisierung.

Die metaphorische Feststellung „Frauen sind von der Venus, Männer vom Mars“ hat eine biologische Basis in

dem evolutionsbiologischen Konflikt zwischen männlichen und weiblichen Interessen. Sexuelle Konflikte sind allgegenwärtig und umfassen Prozesse von der Partnerwahl bis hin zu elterlichen Investitionen in den Nachwuchs (Kasten „Evolutionäre Konflikte der sexuellen Reproduktion“). Sexuelle Konflikte sorgen potenziell dafür, dass jedes Geschlecht versucht, sein bevorzugtes Optimum für ein bestimmtes „Konfliktmerkmal“ zu erreichen [17].

Es gibt also zweifellos „typische“ Männer und Frauen und „typisches“ weibliches und männliches Verhalten, das auf diesen Konflikt zwischen den Geschlechtern zurückzuführen ist und das letztlich auch genetisch verankert ist. Aber es ist eben kein kategorisch binäres Verhalten, das man grundsätzlich einem Individuum zuordnen kann. Das, was als „typisch“ bezeichnet wird, sind Mittelwerte oder eher sogar Extremwerte zweier sich überlappender Verteilungen. Die Individuen selbst sind Mosaik der Eigenschaften, die in jeder Generation neu rekombinieren. Der evolutionäre Konflikt zwischen den Geschlechtern hat ja keine endgültige Lösung, sondern stellt sich immer wieder neu [17]. Insbesondere im Überlappungsbereich der Eigenschaften muss es auch eine Fluidität zwischen den „typischen“ Eigenschaften geben, um die kontinuierliche Evolution zur Lösung des andauernden Konflikts zu ermöglichen. Genderfluidität ist daher nicht nur eine natürliche Erscheinung, sondern sogar eine unausweichliche Konsequenz der sexuellen Reproduktion.

Die Entwicklung der biologischen, genetischen und kulturellen Geschlechtsidentität muss als Gesamtprozess betrachtet werden, der nicht in Kategorien – also auch nicht in erweiterte Geschlechtskategorien – gesteckt werden sollte. Jedes Individuum muss für sich gesehen werden und jedes Individuum sollte daher auch seine Rolle im kontinuierlichen Spektrum der Verteilungen selbst finden dürfen. Kein Individuum sollte sich gedrängt fühlen, sich der sozialen Norm einer Kategorie angleichen zu müssen. Individuen sollten nicht auf ihre Gameten reduziert werden, die evolutionsbiologische und entwicklungsbiologische Realität ist viel komplexer. Insbesondere sollten genderfluide Individuen nicht als Ausnahme von einer Regel betrachtet werden, sondern als selbstverständlicher Teil der evolutionär notwendigen Variabilität innerhalb von Populationen.

Dies gilt im Übrigen nicht nur für den Menschen. Es geht hier um allgemeine biologische Prinzipien. Individuen sind von Natur aus genetisch variabel, aber auch geprägt von der Umwelt, in der sie aufgewachsen sind. Wenn man sie aus experimentell operationalen Kriterien kategorisieren möchte, so wie es in der Verhaltensforschung üblich ist, dann wäre es wichtig, auch die Überlappungsbereiche für die betrachteten morphologischen Charaktere oder die Verhaltensweisen anzugeben und bei der Auswertung zu berücksichtigen. Das ist keine anthropozentrische Sichtweise, sondern die Schlussfolgerung aus den Überlegungen zur Evolution sexueller Systeme.

Ein alternatives Narrativ

Im Biologieunterricht beginnt die Erklärung der Sexualität in der Regel mit der Beschreibung von zwei Geschlechtern, die sich über ihre Gameten definieren. Binärität erscheint daher als biologischer Grundzustand, in dem eine Kategorie „divers“ nur als Ausnahme gesehen wird.

Aber man könnte den Unterricht auch über die biologische Rolle von Sexualität aufbauen, also über die evolutionsbiologische Notwendigkeit Variabilität zu generieren. Dann würde der Unterricht zur Entstehung der Sexualität mit der Erklärung beginnen, dass Variabilität der Kern des Lebens ist. Diese Interpretation der Sexualität wurde bereits von August Weismann vorgeschlagen. In seinem 1886 erschienenen Buch „Die Bedeutung der sexuellen Fortpflanzung für die Selektionstheorie“ [18] schreibt er: „In dieser Vermischung sehe ich die Ursache der erblichen individuellen Charaktere und in der Herstellung dieser Charaktere die Aufgabe der [sexuellen] Fortpflanzung.“ (S. 29) und „Überhaupt wüsste ich der sexuellen Fortpflanzung keine andere Bedeutung beizumessen, als die, das Material an erblichen individuellen Charakteren zu schaffen, mit welchen die Selektion arbeiten kann.“ (S. 43)

Dies sind Kernaussagen, auf die man einen Unterricht aufbauen könnte. Existenz von zwei Geschlechtern erklärt sich dann als biologischer Mechanismus, um diese Variabilität zu sichern. Die primäre Rolle von Männern und Frauen ist es also, Nachkommen zu haben, die anders sind als sie selbst und sich auch untereinander unterscheiden. „Divers“ ist dann keine Ausnahme mehr, sondern Teil des natürlichen Spektrums der Variabilität. Als Biologen sollten wir uns das Darwin-Zitat von oben vor Augen halten. Man kann vollkommen im vorherrschenden Denken gefangen sein, selbst wenn es möglich ist, die Alternativen zu erkennen.

Was sagt das neue Gesetz?

Vor diesem Hintergrund ist der Fortschritt, der mit der neuen Gesetzgebung zur sexuellen Selbstbestimmung erzielt werden soll, eigentlich ein Rückschritt. Statt die behördliche Registrierung von Geschlechtskategorien ganz abzuschaffen, führt man eine weitere Kategorie verbunden mit einer Wahlfreiheit ein. Eigentlich ist das dann aber eine Wahlpflicht, da sich letztlich jedes Individuum zu einem Zeitpunkt fragen muss, welcher Kategorie es zugehört. Man wird gedrängt, sich auf eine Seite zu stellen, selbst wenn man sich gar nicht so sicher ist, wo genau man in dem kontinuierlichen Spektrum steht. Dass es die Kategorie „divers“ gibt, hilft dabei wenig oder ist sogar kontraproduktiv. Denn jede Art von Kategorisierung wird auch wieder zu neuer Diskriminierung führen – und die Gefahr ist bei drei Kategorien sogar höher als bei zwei.

Das Verfassungsgericht hatte mit seinem Urteil von 2017 dem Gesetzgeber eigentlich freigestellt, die Registrierung von Geschlechtskategorien ganz abzuschaffen (Absatz 65 in [3]). Denn bei einer verfassungsrechtlich

gesicherten Gleichstellung der Geschlechter muss der Staat gar nicht mehr wissen, welchem Geschlecht sich jemand zugehörig fühlt.

Das würde selbstverständlich aber nicht zur Abschaffung der Geschlechter führen. Denn um einen Geschlechtspartner zu finden, schaut sowieso niemand vorher im Personenstandsregister nach. Auch die Sorge, dass man mit so einem Schritt Gleichstellungsbemühungen untergraben würde, kann ich nicht sehen. Im Gegenteil: Was passiert denn jetzt, wenn Männer sich als Frauen registrieren lassen, um sich auf für Frauen gedachte Gleichstellungsprogramme bewerben zu können? Man würde dann natürlich den allgemeinen Phänotyp als Zulassungskriterium anwenden, nicht den Eintrag im Personenstandsregister. Aber das wird dann wieder zu neuen rechtlichen Problemen führen.

Der Gesetzgeber hat bei der Neufassung des Gesetzes die Chance verpasst, ein Zeichen zu setzen, dass das binäre Klassifizieren von Geschlechtern der Realität der Individuen nicht gerecht wird. Aber in unserem tief verwurzelten kategorisierenden Denken hat dazu offenbar der Mut gefehlt. Wann werden wir anfangen, statt in Kategorien in kontinuierlichen Verteilungen und ihren Überlappungen zu denken?

Zusammenfassung

Die Evolution der zweigeschlechtlichen Fortpflanzung war und ist ein Motor der Evolution, da sie die für Anpassungen nötige Variabilität zwischen den Individuen generiert. Gegenüber asexueller Fortpflanzung hat sie aber den Nachteil, dass sie rechnerisch nur halb so viele Nachkommen produziert. Zudem führt sie zu evolutionären Konflikten zwischen den Geschlechtern. Diese Nachteile können nur durch den Vorteil der Erzeugung besonders hoher Variabilität aufgewogen werden. Individuen, die aus der sexuellen Reproduktion entstehen, zeigen daher überlappende morphologische Merkmale und Verhaltensweisen, die zudem von der Umwelt mitgeprägt werden. Auch eine Fluidität zwischen den Geschlechtern ist eine natürliche Konsequenz dieser Variabilität. Dieses Kontinuum der Unterschiede wird durch eine Kategorisierung in „männlich – weiblich – divers“ nicht reflektiert.

Summary

Female – male – diverse: Is it that simple?

The evolution of bisexual reproduction was and is the driving force behind evolution, as it generates the variability between individuals that is necessary for adaptation. Compared to asexual reproduction, however, it has the disadvantage that it only produces half as many offspring. It also leads to evolutionary conflicts between the sexes. These disadvantages can only be outweighed by the advantage of producing particularly high variability. Therefore, individuals arising from sexual reproduction show overlapping morphological characteristics and behaviour patterns, which are also influenced by the environment. Fluidity be-

tween the sexes is also a natural consequence of this variability. This continuum of differences is not reflected by a categorization into “male – female – diverse”.

Schlagworte:

Selbstbestimmungsgesetz, Evolution sexueller Reproduktion, evolutionärer Konflikt, *two-fold cost of sex*, *Muller's ratchet*, Fluidität der Geschlechter, Gender, Mosaikstruktur der Geschlechtsphänotypen, Gameten, Isogamie, Anisogamie, Variabilität, Heritabilität, polygene Vererbung

Literatur

- [1] M. Delbrück (1949). A physicist looks at biology. *Resonance* 4, 89–102.
- [2] BMFSFJ. (2024). Gesetz über die Selbstbestimmung in Bezug auf den Geschlechtseintrag und zur Änderung weiterer Vorschriften. Bundesgesetzblatt I, <https://www.recht.bund.de/bgbl/1/2024/-206/VO>.
- [3] BverfG (2017). Beschluss des ersten Senats vom 10. Oktober 2017. BvR 2019/16, 1–69, https://www.bundesverfassungsgericht.de/SharedDocs/Entscheidungen/DE/2017/10/rs20171010_1bvr201916.html.
- [4] W. Goymann et al. (2023). Biological sex is binary, even though there is a rainbow of sex roles denying biological sex is anthropocentric and promotes species chauvinism. *Bioessays* 45, 10.1002/bies.202200173.
- [5] J. Maynard Smith (1978). *The evolution of sex*. Cambridge University Press.
- [6] M. Neiman et al. (2017). Why sex? A pluralist approach revisited. *Trends in Ecology & Evolution* 32, 589–600. 10.1016/j.tree.2017.05.004.
- [7] E. Damm, L. Odenthal-Hesse (2023). Orchestrating recombination initiation in mice and men. 151, 27–42.
- [8] J. Lehtonen et al. (2016). What do isogamous organisms teach us about sex and the two sexes? *Philosophical transactions of the Royal Society B – Biological Sciences* 371, 10.1098/rstb.2015.0532.
- [9] S. Breton, D. Stewart (2015). Atypical mitochondrial inheritance patterns in eukaryotes. *Genome* 58, 423–31, 10.1139/gen-2015-0090.
- [10] H. Kokko, M. Jennions (2008). Parental investment, sexual selection and sex ratios. *Journal of Evolutionary Biology* 21, 919–48, 10.1111/j.1420-9101.2008.01540.x.
- [11] D. L. Maney (2016). Perils and pitfalls of reporting sex differences. *Philosophical Transactions of the Royal Society B – Biological Sciences* 371, 10.1098/rstb.2015.0119.
- [12] P. U. Unschuld (2024). *A catalog of benevolent items. Li shizhen's compendium of classical chinese knowledge*. Oakland, California, University of California Press, 194–197.
- [13] C. Darwin (1871). *Descent of man, and selection in relation to sex*. John Murray, London.
- [14] D. Joel et al. (2020). The complex relationships between sex and the brain. *Neuroscientist* 26, 156–69, 10.1177/1073858419867298.
- [15] L. Rodríguez-Montes et al. (2023). Sex-biased gene expression across mammalian organ development and evolution. *Science* 382, 10.1126/science.adf1046.
- [16] C. Xie et al. (2024). Fast evolutionary turnover and overlapping variances of sex-biased gene expression patterns defy a simple binary classification of sexes. *eLife* 13, RP99602.
- [17] T. Chapman (2006). Evolutionary conflicts of interest between males and females. *Current Biology* 16, R744–R54, 10.1016/j.cub.2006.08.020.
- [18] A. Weismann (1886). *Die Bedeutung der sexuellen Fortpflanzung für die Selektionstheorie*. Jena, Verlag Gustav Fischer.

Verfasst von:



© Ignus Dreyer, SCPS (Stellenbosch Centre for Photographic Services)

Nach seinem Biologiestudium an den Universitäten Frankfurt und Tübingen verfasste Diethard Tautz eine Doktorarbeit über simple DNA-Sequenzen in Eukaryonten am European Molecular Biology Laboratory (EMBL) in Heidelberg. Anschließend verbrachte er Postdoktoranden-Zeiten an der University of Cambridge, UK und am Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie in Tübingen. Dort spezialisierte er sich auf Mechanismen der molekularen Evolution und der Evolution entwicklungsbiologischer Prozesse. Nach Professuren an der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) München und der Universität Köln wurde er 2007 zum Direktor am Max-Planck-Institut für Evolutionsbiologie in Plön berufen. Seit 2023 ist er dort Emeritus Professor und derzeit Fellow am Stellenbosch Institute for Advanced Studies – STIAS.

Korrespondenz

Prof. Dr. Diethard Tautz
Max-Planck-Institut für Evolutionsbiologie
August-Thienemann-Straße 2
24306 Plön
E-Mail: tautz@evolbio.mpg.de

NEUE HANDREICHUNG FÜR LEHRKRÄFTE: „MIKROBIOLOGIE IN DER SCHULE“

In Zusammenarbeit mit dem Jenaer Exzellenzcluster Balance of the Microverse hat das Team der Arbeitsgruppe Biologiedidaktik der Universität Jena unter der Leitung von Prof. Uwe Hoßfeld eine neue Sammlung ausgewählter Unterrichtsmaterialien zum Thema „Mikrobiologie in der Schule“ erstellt. Die daraus entstandene Handreichung steht ab sofort im Rahmen der Microverse-Bildungsaktivitäten zum Download bereit. Sie richtet sich an Biologielehrkräfte der Klassen 7 bis 12 und bietet kompakte, praxisorientierte Informationen zu Mikroorganismen, Kulturmedien sowie Vorschläge für Unterrichtsexperimente.

Ziel dieses praktischen Leitfadens ist es, Lehrkräften gezielte Unterstützung bei der Vermittlung mikrobiologischer Inhalte zu bieten, die in den Standardlehr- und Bildungsplänen oft nur am Rande behandelt werden. Ein besonderes Merkmal dieses Projekts ist die enge Zusammenarbeit zwischen dem Exzellenzcluster und dem Team der Biologiedidaktik. Sie schließt die Lücke zwischen Spitzenforschung und Lehre und macht komplexe wissenschaftliche Themen für den Unterricht zugänglich. Das Projekt zeigt zudem das Engagement, eine aktive Rolle in der Bildung einzunehmen und neue Ansätze für die Vermittlung naturwissenschaftlicher Fächer zu entwickeln. Die Handreichung steht zum kostenlosen Download bereit unter <https://t1p.de/rof2g>.





Verband | Biologie, Biowissenschaften
& Biomedizin in Deutschland

**GEMEINSAM
FÜR DIE**

BIEWISSENSCHAFTEN

Gute Gründe, dem VBIO beizutreten:

- Werden Sie Teil des größten Netzwerks von Biowissenschaftlern in Deutschland.
- Unterstützen Sie uns, die Interessen der Biowissenschaften zu vertreten.
- Nutzen Sie Vorteile im Beruf.
- Bleiben Sie auf dem Laufenden – mit dem VBIO-Newsletter und dem Verbandsjournal „Biologie in unserer Zeit“.
- Treten Sie ein für die Zukunft der Biologie.



www.vbio.de

Jetzt beitreten!

