



Viele werden eins

Aus der Reihe **FIDS!** - **Forschung in die Schule!**
Fakultät für Physik der LMU München

Zusammenarbeit von:
Dr. Pascal Eitner und Prof. Dr. Juan Gaviria

Dr. Cecilia Scorza
Kordinatorin



Materialien

Wissenschaftliche Hintergründe

Aktivitäten und Aufgaben

Anwendungen in der aktuellen Forschung

Zielsetzung

Die Evolution verläuft manchmal in Stufen. Seit der „Erfindung“ der Mitochondrien vor etwa zwei Milliarden Jahren hat sich das Leben in vielen Schüben weiterentwickelt. Irgendwann begann es sich zu vernetzen. Aus Einzellern wurden Vielzeller, die Organe ausbildeten und deren Zellen Arbeitsteilung praktizierten. Und aus Vielzellern wurden Superorganismen, die Hierarchien schufen und die eine Schwarmintelligenz entwickelten. Schon lange vor der Erfindung der sozialen Netzwerke gab es Gemeinschaften von Gleichgesinnten, die untereinander kommunizierten und sich abstimmten. Dadurch konnten große Aufgaben mit neuen Konzepten gemeistert werden, die den Horizont des Individuums weit überstiegen.

In diesem Kapitel entdecken wir, dass es Phänomene gibt, die als unvorhergesehener und unplanbarer Bonus das Leben bereichern. „Das Ganze ist mehr als die Summe der Einzelteile“ soll der griechische Philosoph Aristoteles gesagt haben. Auch scheinbar selbstverständliche biologische Konzepte wie Sexualität und Tod erscheinen dadurch in einem neuen Licht.

Inhaltsverzeichnis

Zielsetzung.....	2
7.1 Zellkolonien und Arbeitsteilung	4
7.2 Sexualität und Tod	5
7.3 Gewebe- und Organbildung	6
7.4 Der Weg zum Superorganismus	7
Aktivitäten	8
1.1. Aktivität: Vorsprung durch Sexualität.....	8
1.2. Aktivität: Schwarmintelligenz im Sciencefiction.....	9
Literaturquellen.....	10
Bildnachweis.....	11

7.1 Zellkolonien und Arbeitsteilung

Sobald die Eukaryonten dank der Mitochondrien und anderer neu geschaffener Kompartimente das Leben eine Evolutionsstufe weitergetragen hatten, war der Weg frei für den nächsten logischen Entwicklungsschritt. Wenn sich schon eine Zelle durch Größenwachstum besser vor störenden Umwelteinflüssen schützen kann, dann sollte ein Zusammenschluss gleichartiger Zellen ebenfalls von Vorteil sein. Bei den Prokaryonten gab es dazu schon vielversprechende Ansätze. Unter einem sogenannten Biofilm versteht man eine Gemeinschaft von Bakterien oder Archaeen, die in einer extrazellulären Matrix eingebettet sind, welche von allen Zellen gemeinsam gebildet wird. Die Matrix fördert einen lockeren Verbund der Zellen, die von der gegenseitigen Nähe profitieren: Der Biofilm bietet Schutz vor aggressiven Chemikalien und Antibiotika sowie vor schädlicher Strahlung, er ermöglicht die Besiedlung neuer Oberflächen und schützt vor Abrieb. Aber trotz all der Tricks der Prokaryonten haben sich nur aus Eukaryonten echte Vielzeller mit Geweben und Organen entwickelt.

Welche Hürden auf dem Weg zur Entstehung echter Vielzeller genommen werden mussten, lässt sich beispielsweise an Grünalgen nachvollziehen (Abbildung 1). Die einzellige Grünalge *Chlamydomonas* enthält u. a. einen becherförmigen Chloroplasten und zwei Geißeln für die Fortbewegung. Ein „Augenfleck“ ermöglicht ihr die gerichtete Bewegung auf eine Lichtquelle zu. Wenn es nach der nächsten Zellteilung nicht mehr zu einer vollständigen Trennung der Tochterzellen kommt, bildet sich eine Kolonie gleichartiger Zellen heraus. Diese Stufe hat die Gattung *Gonium* erreicht: Vier gleichartige Zellen umgeben sich mit einer gemeinsamen, scheibenartigen Gallerte. Diese dient einerseits als Kit zwischen den Zellen, verringert aber auch ein Absinken in tiefere Gewässer, wo zu wenig Sonnenlicht für ein Wachstum der Algen vorhanden wäre. Außerdem sorgt die Größe des Viererpaketes für einen gewissen Fraßschutz. Es gibt auch größere Zellkolonien nach dem gleichen Muster: *Eudorina* mit 16 und *Pandorina* mit 32 Zellen. Auffällig ist die darin steckende Zweierpotenz, die sich dadurch erklärt, dass sich die Zellen durch Zweiteilung vermehren. Innerhalb der Pakete unterscheiden sich die Einzelzellen aber nicht: Sie sind alleine lebensfähig und können neue Kolonien gründen.

Die echte Vielzelligkeit kommt erst mit der Wimpernkugel *Volvox* (Abbildung 2) ins Spiel. Diese Grünalge besteht aus einigen tausend begeißelten Einzelzellen, die alle über kleine Plasmabrücken mit den Nachbarzellen kommunizieren. Neu ist aber, dass die Einzelzellen nicht mehr außerhalb der Kugelalge lebensfähig sind, und dass nicht mehr alle gleichwertig sind – es herrscht Arbeitsteilung. Die allermeisten Zellen gehören zum grünen, vegetativen Typ (Körperzelle), der für Fortbewegung und Ernährung zuständig ist. Demgegenüber gibt es eine kleine Anzahl von farblosen Zellen ohne Chloroplast, die als generative Zellen allein für die Fortpflanzung wichtig sind. Durch Zellteilung entstehen im Inneren kleine Tochterkugeln, oder es bilden sich Eizellen und Spermien, die sich befruchten. Sobald im Inneren der Mutterkugel verschiedene Tochterkugeln herangereift sind, können diese nur ins Freie gelangen, wenn die Mutterkugel an einer Seite aufreißt – wonach sie stirbt. So findet man erstmals in der Geschichte des Lebens eine Leiche als Folge der Vermehrung. Der Tod gehört jetzt zum Leben dazu.

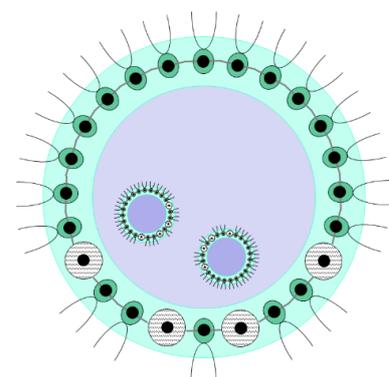
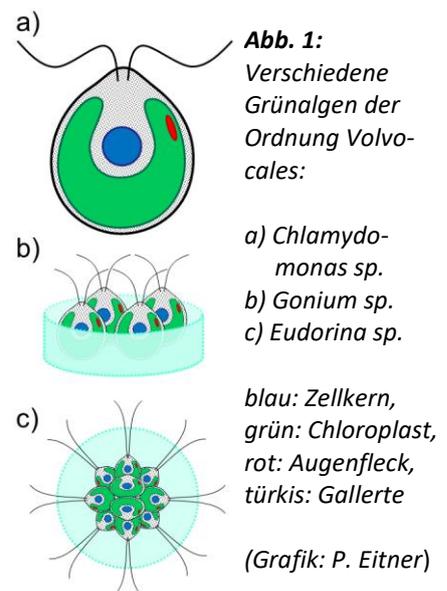


Abb. 2: Kugelalge *Volvox* mit zwei Tochterkugeln im Inneren. Grün: Vegetative Zellen, farblos: generative Zellen, türkis: Gallerte (Grafik: P. Eitner).

7.2 Sexualität und Tod

Das Ganze ist mehr als die Summe der Einzelteile. Dieser Grundsatz, der dem griechischen Philosophen Aristoteles zugeschrieben wird, besagt, dass beim Zusammenbau eines Objekts aus dessen Einzelteilen neue Eigenschaften (Emergenzen) entstehen können, die vorher nicht abzusehen waren. So können die Bauteile eines Waldhorns nebeneinander gelegt vielleicht ein schönes Muster ergeben (Abbildung 3). Aber erst durch ihre korrekte Verknüpfung entsteht ein Instrument, mit dem man Musik machen kann. Vergleicht man einen



Abb. 3: Einzelteile des Waldhorns: 1 – Mundrohr; 2 – Stimmbojen; 3 – Anstoß; 4 – Zwingen; 5 – Stengel; 6 – Verschraubung; 7 – Schallbecher; 8 – Maschine; 9 – Ventilbögen; 10 – Fingerhaken (Foto: B. Meyer).

vielzelligen Organismus wie die Kugelalge mit ihren Bestandteilen (Einzelzellen und Gallerthülle) kommt auch das Element des Todes neu hinzu. Vorher waren Zellen potenziell unsterblich, sofern sie nicht beschädigt wurden: Die Mutterzelle verwandelte sich durch Zweiteilung direkt in ihre Tochterzellen, die wiederum durch Zweiteilung die nachfolgende Generation hervorbrachten. Es gab nie eine Leiche. Bei den Vielzellern ist die Lebensspanne eines Organismus dagegen von vorneherein begrenzt. Der Tod der älteren Generation schafft Platz und Ressourcen für die neue Generation.

Schon bei der Entwicklung der höheren Zellen entstanden erste Eigenschaften, die in der Welt der Prokaryonten unbekannt – und unvorhersehbar –

waren. Die Vermehrung ging vorher von jeder Zelle selbst aus. Bei den eukaryontischen Einzellern hingegen überwiegt nicht mehr das Prinzip „Vermehrung durch Zweiteilung“, sondern es müssen immer zwei Zellen zusammenfinden und das gesamte Erbgut durchmischen, bevor eine neue Generation entstehen kann. Das Vermehrungsprinzip der Sexualität entwickelte sich zum durchschlagenden Erfolg unter den höheren Zellen, sodass sich heute die meisten Vielzeller sexuell vermehren. Vielzeller bilden eine spezielle Zellart, die ausschließlich für die sexuelle Vermehrung zuständig ist. Das typische Merkmal dieser sogenannten Keimzellen ist ihre Fähigkeit miteinander zu verschmelzen und so einen neuen Organismus hervorzubringen. Obwohl die sexuelle Vermehrung – Ausbildung zweier Geschlechter, Partnerfindung, -werbung und -verteidigung – zeit- und ressourcenaufwändig ist müssen ihre Vorteile überwiegen, da sie sonst nicht so weit verbreitet wäre.

Die Vermischung des Erbguts zweier Individuen hatte wahrscheinlich mehrere Vorteile. Zum einen können auf diese Weise schneller neue Genvarianten erworben werden, als wenn diese nur durch zufällige Mutationen an wenigen Stellen des Erbguts entstehen. Zur sexuellen Vermehrung gehört die Bildung von Keimzellen durch die Meiose, sodass jede ein Genom mit einer einzigartigen Kombination von Genvarianten besitzt. Nach der Verschmelzung der Keimzellen zweier Individuen findet dann eine noch stärkere Durchmischung des Erbguts statt. Auf diese Weise erreicht eine Art in kurzer Zeit eine große genetische Variation der Nachkommen, von denen die Selektion die am besten Angepassten fördert („Survival of the fittest“).

Als die Prokaryonten zu Eukaryonten wurden, entwickelte sich eine neue Bedrohung für das Erbgut. Durch die Endosymbiose entstanden in der Zelle vermehrt freie Sauerstoffradikale, die das vergrößerte Genom der Organismen stark schädigen konnten. Die sexuelle Vermehrung könnte eine Antwort auf diesen oxidativen Stress gewesen sein. Durch die Kombination der Genome von zwei Geschlechtern konnten womöglich durch Sauerstoffradikale ausgelöste Defekte in lebenswichtigen Genen ausgeglichen werden. Da die Radikale das

Genom an zufälligen Stellen treffen, ist es unwahrscheinlich, dass ein korrespondierendes Gen in beiden Genomen beschädigt ist [1, 2]. Durch die Kombination der Gene aus zwei Organismen, ist die Wahrscheinlichkeit höher, dass mindestens eine funktionierende Genkopie übrig bleibt, die das Überleben sichert.

7.3 Gewebe- und Organbildung

In der Regel sind Vielzeller größer als Einzeller. Und so wie schon bei der Entstehung der größeren Eukaryonten aus kleinen Vorläuferzellen eine neue Infrastruktur innerhalb der Zelle entstehen musste, so mussten sich die Vielzeller intern auch neu organisieren und Strukturen schaffen, die vorher noch nicht vorhanden waren. Die Arbeitsteilung der Zellen innerhalb eines echten Vielzelllers wird effektiver, wenn sich gleichartige Zellen mit gleichartigen Aufgaben zu Geweben zusammenschließen (Abbildung 4). Auch Innerhalb einer Fabrik ist es sinnvoll, alle Angestellten mit denselben Fähigkeiten und Aufgaben als Gruppe arbeiten zu lassen. Fertigung, Versand, Marketing und Verwaltung sind nicht zufällig über das Gebäude verstreut, sondern so organisiert, dass Logistik und Kommunikation möglichst effektiv werden.

Damit bei der Entstehung eines echten Vielzelllers alle Zelltypen ihren richtigen Platz finden, müsste es entweder eine riesige Vielfalt von „Platzanweisern“ geben – also Zellen, die anderen Zellen den Weg weisen, oder es greift ein anderer Mechanismus. Tatsächlich ist es die aus der Präbiotik schon bekannte Selbstorganisation, die während der Reifung eines Individuums am Werk ist. Zu Beginn seines Lebens besteht der Vielzeller aus gleichartigen Zellen, die noch unspezialisiert sind (totipotente Stammzellen, Abbildung 4).

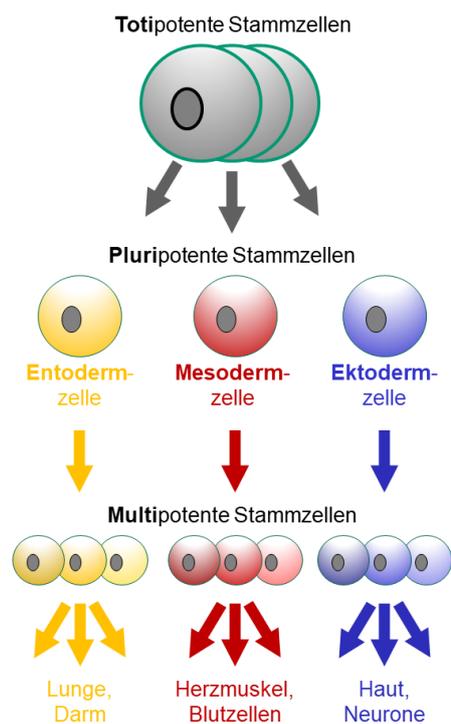


Abb. 4: Zelldifferenzierung erfolgt in mehreren Schritten (Grafik: P. Eitner).

Während der Embryo wächst, bilden sich entlang verschiedener Körperachsen Konzentrationsgradienten aus, die zum Beispiel aus Wachstumsfaktoren bestehen. Damit wird beweglichen Zellen eine Richtung vorgegeben, und auch für unbewegliche Zellen steckt in den Gradienten eine Ortsinformation, die ihren weiteren Werdegang steuert. Tiere bilden drei Urdgewebeschichten („Keimblätter“) aus: Je nach Lage im frühen Embryo unterscheidet man Ekto-, Meso-, und Entoderm. Auf die Zellproliferation folgt also die Zelldifferenzierung, solange bis die Zellen sich endgültig spezialisiert haben: als Herzzelle, als Pollenmutterzelle, als Nervenzelle, als Wurzelhaubenzelle ... Auch für die Ausbildung einer rechten und linken Körperseite gibt es genau festgelegte, molekulare Abläufe, die den frühen Embryo prägen. Bei Tieren ist es der sogenannte Links/Rechts-Organisator, der aus einem kugelsymmetrischen Bläschenkeim einen bilateralen Embryo erschafft [3, 4]. Die Selbstorganisation ist also dafür zuständig, dass alle Gewebe an der richtigen Stelle im Körper entstehen und dort ihre Wirkung entfalten.

Die Vielseitigkeit der Organismen, die sich aus dem Prinzip der Arbeitsteilung und Differenzierung ergeben, hat in der Folge zu einer Explosion der Biodiversität beigetragen – eine Vielfalt verschiedener Lebensformen und Erscheinungen, getragen von höheren Einzellern, und vielzelligen Algen, Pflanzen, Pilzen und Tieren, die es unter den Prokaryonten nicht gegeben hat.

7.4 Der Weg zum Superorganismus

Es ist nur folgerichtig, dass die Evolution nicht bei den individuellen Organismen aufhörte. Nachdem sich einzelne Zellen zu Vielzellern zusammengeschlossen hatten, konnten sich jetzt auch einzelne Vielzeller zu Großgruppen zusammenschließen: Familien, Rudeln, Herden, Schwärmen, Kolonien, Staaten. Wie nicht anders zu erwarten, entstanden bei jedem Zusammenschluss neue Eigenschaften aus der Verknüpfung der Bestandteile, die nicht vorhersehbar waren. Diese synergistischen Effekte oder Emergenzen sind das Ergebnis der Vernetzung und der Entstehung übergeordneter Systeme und können Wunderbares bewirken. Schon auf molekularer Ebene führte die Verknüpfung der beiden Photosysteme I und II bei den Cyanobakterien zu einer höheren Lichtausbeute als sich aus der Summe der Lichtausbeuten der beiden einzelnen Systeme errechnen lässt (Abbildung 5). Auch die Produktivität von Symbiosen liegt meist über der Summe der Einzelerträge von Wirt und Symbiont (z. B. Faktor 4-20 beim Algenfarn/Cyanobakterium-Gespann). Beim Zusammenbau des menschlichen Gehirns aus Milliarden von einzelnen Nervenzellen entstand Bewusstsein. Welche synergistischen Effekte sind aber die Folge der Vernetzung von tausenden von Individuen zu Herden oder Staaten?

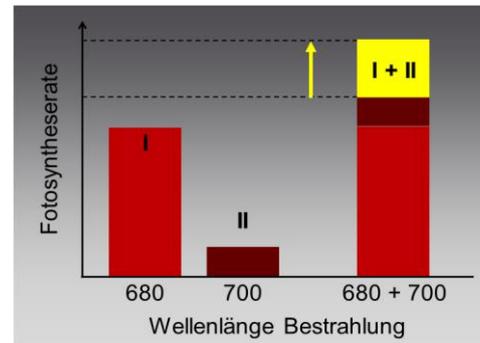


Abb. 5: Der Emerson-Effekt (gelb) entsteht durch die Kopplung der beiden Photosysteme (Grafik: P. Eitner)

Betrachtet man ein Bienenvolk oder einen Fischschwarm (Abbildung 6), so fallen Verhaltensweisen auf, die höchst erstaunlich sind. Woher weiß die Einzelbiene, wann sie welche Aufgabe im Staat übernehmen soll? Woher weiß der Hering, wohin er am besten schwimmt, sobald Angreifer erscheinen? Woher weiß die Ter-



Abb. 6: Der Schwarm bietet Schutz vor Raubfischen (Foto: G. Firestein, Seacology).

mite, nach welchen architektonischen Prinzipien ihr Bau entstehen muss, um eine optimale Klimatisierung zu gewährleisten? Wieviel weiß der Nacktmull über die Grundsätze der Verwandtenselektion? Es gibt in solchen Kollektiven niemanden, der alle Kommandogewalt in sich vereinigt und die anderen zu ihren Aufgaben anweist. Auch eine Ameisen- oder Nacktmullkönigin kennt nicht die Hintergründe für das Wohlergehen der Kolonie. Tatsächlich können die kleinen Gehirne dieser Tiere nur sehr wenig „wissen“. Trotzdem wertet man viele Verhaltensweisen als klug, umsichtig oder vorausschauend. Selbst bei den erstaunlich einfachen Schleimpilzen, die nur aus einer einzigen Zelle mit vielen Zellkernen bestehen, findet sich „intelligentes“ Verhalten – und das ganz ohne Nervensystem. Sie finden den kürzesten Weg durch ein Labyrinth und lösen logistische Optimierungsaufgaben.

Durch den Zusammenschluss vieler gleichartiger Individuen kann „Schwarmintelligenz“ entstehen [5]. Diese leistet erstaunliches in Bezug auf Nest- und Straßenbau, Klimatisierung und Frischluftzufuhr, Jagdstrategien und Nahrungserwerb, Abwehr von Feinden, Brutfürsorge, Krankenpflege und Kommunikation. Auch aus diesen Gründen sprechen Wissenschaftler von Superorganismen: Der Bien ist beispielsweise der Begriff für den Superorganismus Bienenvolk, der aufgrund der Schwarmintelligenz mehr kann als die Summe der Einzelleistungen aller Bienenmitglieder. Die Vernetzung ist der Schlüssel zur nächsten Evolutionsstufe.

Aktivitäten

Aktivität 1 – Vorsprung durch Sexualität

Hintergrund

Sexuelle Vermehrung hat ihren Preis. Sie braucht viel Zeit, Energie und erfordert ein zweites Geschlecht. Obwohl Partnersuche, -werbung und -bindung einen immensen Aufwand bedeuten, bevorzugen fast alle höheren Organismen diese Art der Vermehrung. Den Grund dafür vermuten Biologen in der besseren Anpassungsfähigkeit an neue Umweltbedingungen. Ansätze zur experimentellen Überprüfung dieser Hypothese werden zwar gerade erst erdacht, aber mit einer passenden Simulation lässt sich jetzt schon zeigen, warum „Sex gewinnt“.

„Das vorgestellte Programm simuliert das evolutionäre Wettrennen zweier Populationen gegen einen Parasiten. Die eine Population pflanzt sich ungeschlechtlich, die andere geschlechtlich fort. Wachstum und Fitness der beiden Populationen können über die Generationen verfolgt werden.“ [6]

Material / Durchführung

Die Familie Bossert engagiert sich seit vielen Jahren für einen Biologieunterricht mit problemlösendem Ansatz. Sie hat eine Simulation konzipiert, die sich kostenlos herunterladen lässt:

www.bossert-bcs.de/biologie/biosex.htm (229 kB als zip-Datei)

Darin wird ein Wirt durch einen Parasiten bedroht. Als Maß für die Überlebensfähigkeit des Wirts gilt der GC-Gehalt seiner Gene, die sich über Mutation (nichtsexuelle Vermehrung) und zusätzlich über genetische Rekombination (sexuelle Vermehrung) verändern kann. Bei der Simulation werden verschiedene Parameter eingestellt, wie die Gefährlichkeit des Parasiten („Parasitkill“), oder die Mutationsrate des Wirtsgenoms. Am Ende einer voreingestellten Anzahl an Durchläufen lassen sich die Ergebnisse grafisch darstellen (Abbildung 7). Eine detaillierte Anleitung findet sich auf der oben genannten Seite.

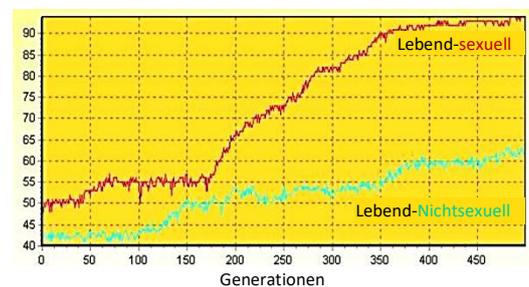


Abb. 7: Simulation des Einflusses des Parasiten auf die Überlebensrate (Grafik: Biosex).

Aufgaben

1. Vergleichen Sie die Vor- und Nachteile der beiden Vermehrungsarten in einer Tabelle.

Merkmal	Sexuelle Vermehrung	Nichtsexuelle Vermehrung
Vermehrungsrate	Langsam	Schnell → +
Geschlechtspartner nötig	Ja	Nein → +
Zeit- und Ressourcenaufwand	Groß	Klein → +
Variabilität	Sehr groß → +	Sehr klein
Anpassungsfähigkeit	Sehr groß → +	Sehr gering

2. Erklären Sie, welche zellulären Abläufe bei der sexuellen Vermehrung die Anpassungsfähigkeit vergrößern.

Meiose: Genetische Rekombination des Erbguts in den Keimzellen. Jede Keimzelle ist anders.

Befruchtung: Vermischung des Erbguts von 2 Keimzellen zweier Individuen zur befruchteten Eizelle.

3. Lassen Sie „Biosex“ 5 über 500 Zyklen laufen und variieren Sie die Mutationsrate. Beschreiben und erläutern Sie den Effekt.

Die sexuelle Vermehrung gewinnt immer noch, weil genetische Rekombinationen immer effektiver sind.

Aktivität 2 – Schwarmintelligenz im Sciencefiction

Hintergrund

Die Drehbuchautoren von Sciencefiction-Filmen haben viele Konzepte aus der Biologie übernommen, darunter die „Schwarmintelligenz“. In der „Star Trek“-Reihe trifft die Besatzung des Raumschiffes „Enterprise“ mehrmals auf einen Gegner, der das Schwarmkonzept weiterentwickelt hat. Die sogenannten „Borg“ verfolgen dabei Strategien, die sich in Vielzellern und Schwärmen wiederfinden. In ihrem totalitären Streben nach Perfektion und der unnachgiebigen Zwangsrekrutierung der Schwarmmitglieder wirken die „Borg“ zwar grausam, und auch wenn die technische Umsetzung der „Borg“ – passend zum Filmgenre – nach Zukunftsmusik klingt, so sind doch die biologischen Vorbilder real und schon heute auf der Erde zu finden.

Material

Text- und Filmmaterial zu den „Borg“ finden sich im Internet (Abbildung 8, wikipedia, youtube) oder direkt im Film „Star Trek 6 – Der erste Kontakt“. Textbasiertes Material sollte auf jeden Fall an die Schüler ausgeteilt werden. Sehr lesenswert: „Das Wir in der Science-Fiction: Sternenflotte oder Borg-Kollektiv?“ (von deutschlandfunkkultur.de)



Abb. 8: Screenshot eines Videospieles über die Borg (Grafik: N. Bandal).

Durchführung

Die Lernenden analysieren Textmaterial und Filmausschnitte und vergleichen die Organisation der Borg mit einem Insektenstaat (z. B. Bienenvolk).

Aufgaben

1. Beschreiben Sie die Merkmale, die die „Borg“ zu einem Schwarm machen.

Die Individuen arbeiten sehr eng zusammen für das „Gemeinwohl“ und verzichten dafür auf individuelle Freiheit. Alle Mitglieder der „Borg“ sind miteinander vernetzt und profitieren vom Wissen der anderen.

2. Erklären Sie, was die „Borg“ unter „Assimilation“ verstehen.

Bei der Rekrutierung neuer Mitglieder setzen die „Borg“ auf Versklavung von ehemals freien Lebensformen. Diese werden körperlich so verändert, dass sie im Kollektiv besser funktionieren und ihr Wissen dem Kollektiv zur Verfügung stellen.

3. Legen Sie dar, welche Vorteile die Organisation der „Borg“ dem Kollektiv bietet und warum es uns Menschen zutiefst unsympathisch ist.

Das Wohl des Einzelnen wird dem Gemeinwohl untergeordnet. Die Mitglieder der „Borg“ (genannt Drohnen) sind sehr anpassungsfähig und damit erfolgreich, verlieren aber ihren eigenen Willen und wirken automatenhaft bzw. fremdgesteuert.

4. Ziehen Sie Parallelen zwischen den „Borg“ und unserem Internet und arbeiten Sie auch grundsätzliche Unterschiede heraus.

Das Wissen der Einzelnen ist für alle und jederzeit abrufbar. Gleichzeitig kommunizieren die Mitglieder über dasselbe Medium miteinander. Im Unterschied zu den Borg sollten die Menschen aber durch das Internet nicht fremdbestimmt sein. Viele Menschen sehen das Internet als Mittel gegen Unterdrückung.

Literaturquellen

- [1] Hörandl E, Speijer D (2018) How oxygen gave rise to eukarotic sex, Proc Royal Soc B
Doi: 10.1098/rspb.2017.2706
- [2] Lane N (2017) Der Funke des Lebens. Energie und Evolution. Theiss, Darmstadt Verlag
ISBN: 9783806234848
- [3] Blum M, Schweickert A, Vick P, Wright CVE, Danilchik MV (2014) Symmetry breakage in the vertebrate embryo: When does it happen and how does it work? Developmental Biology, 393 : 109–123.
- [4] Eitner P (2020) Rechts vor links? – Die Händigkeit des Lebens, Biologie In Unserer Zeit, 2-2020 : 110 - 115
- [5] Eitner P (2021) Schwarmintelligenz – Vernetzung schafft Zugang zur nächsten Ebene, Biologie In Unserer Zeit, 4-2021 : 330-336
- [6] Bossert O, Bossert U, (2000) Sex gewinnt, Math Naturwiss. Unterricht 53 - 6 : 361-363

Bildnachweise

Abb. 3. Berndt Meyer CC BY-SA 3.0

Abb. 6. G. Firestein. Seacology USA. CC BY-SA 3.0