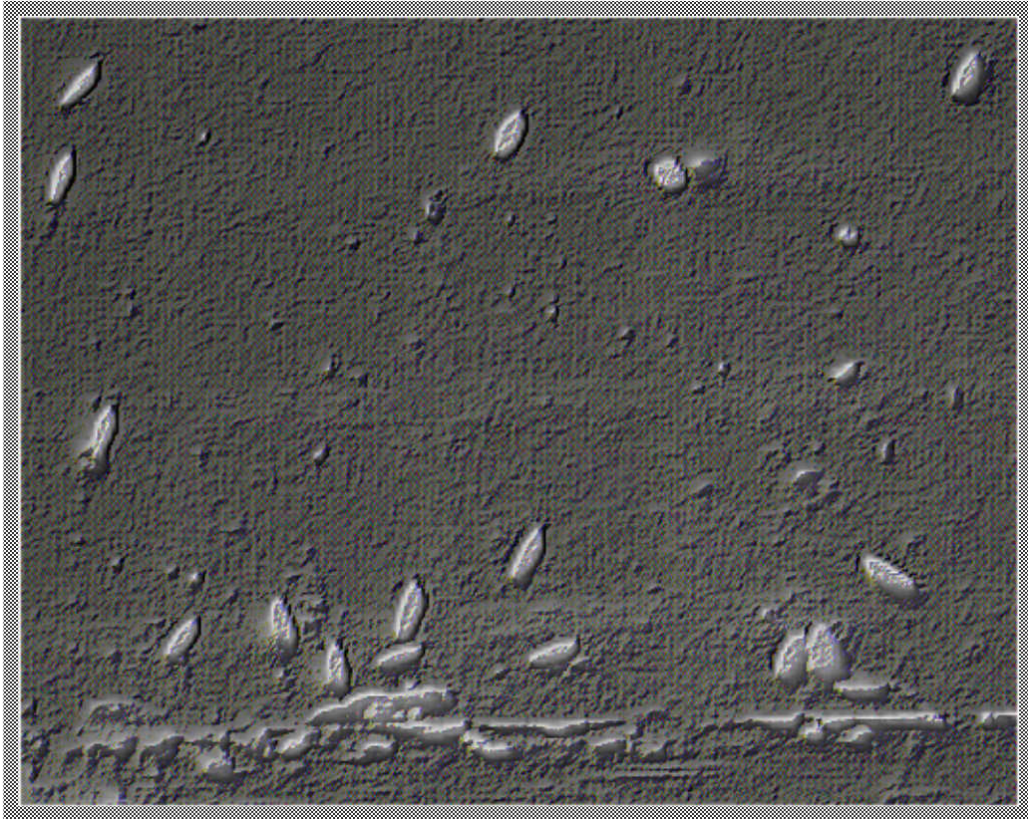


Was steuert das Pantoffeltier?



**Eine Jugend-forscht-Arbeit von
Sebastian Benden und Veronika Unger**

2006

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	3
2. THEORIE:	4
2.1. CILIATEN	4
2.1.1. Anatomie.....	4
2.1.2 Verhalten.....	4
2.2 DER CILIENAPPARAT	5
2.2.1 Aufbau.....	5
Funktionsweise	6
3. MATERIAL UND METHODEN	8
3.1 KULTUREN	8
3.2 BEOBACHTUNGSAPPARATUR.....	9
3.3 VERSUCHSAUFBAUTEN	10
3.3.1 Lichtgradient	10
3.3.2 Temperaturgradient	10
3.3.3 Chemischer Gradient	11
3.3.4 Elektrizität	11
3.3.5 Fremdgegenstände	12
4. ERGEBNISSE.....	12
4.1 Lichtgradient	12
4.2 Temperaturgradient	12
4.3 Chemischer Gradient	12
4.4 Elektrizität	13
4.5 Fremdgegenstand.....	13
5. DISKUSSION DER ERGEBNISSE	13
6. EMPFEHLUNGEN ZUM BAU VON NANOMASCHINEN.....	14
7. RÜCKBLICK UND AUSBLICK.....	15
8. LITERATURANGABEN	15
9. DANK.....	15

1. Einleitung und Zielsetzung

In den letzten Jahren hat die Nanotechnologie eine rasante Entwicklung genommen, da man sich von ihr zahlreiche neue Produkte verspricht. Hier zu zählt auch der Bau und die Steuerung von Nanomaschinen. Das Problem dieser Vision ist jedoch, dass ihre Realisierung sehr kompliziert ist und in weiter Ferne liegt. Anfänglich versuchte man in der Denkweise von Maschinenbauern an dieses Problem heranzugehen. Dieser Weg, elektromechanische Nanomaschinen zu bauen, hat sich jedoch als Irrweg erwiesen. Große Dinge lassen sich nicht einfach verkleinern, denn in der Welt des Kleinen nimmt die Bedeutung der Gravitationskraft ab und die Bedeutung der elektrischen Kraft stark zu. D. h., die kleine Welt ist sehr klebrig, sodass Nanomaschinen anders angetrieben werden müssen als z. B. ein U-Boot (s. Abb. 1.1). Auch können Nanomaschinen nicht über Funk ferngesteuert werden, da die entsprechende Empfangsapparatur einfach zu groß wäre.

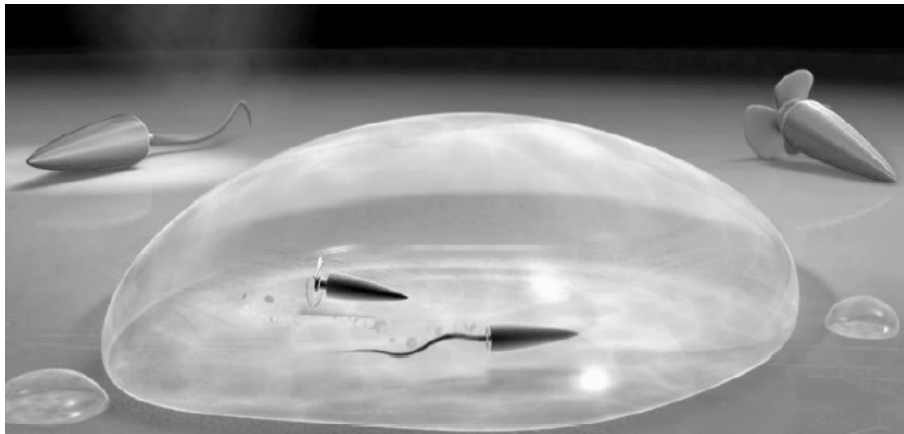


Abb. 1.1: Nanomaschinen in einem Wassertropfen
(Kopie aus: MIKROWELTEN – Eine Reise in die Mikrosystemtechnik)

Unserer Meinung nach werden nicht die Maschinenbauer, sondern die Biologen die ersten Nanomaschinen bauen und steuern. Denn wie in so vielen Fällen wird auch hier die Natur Pate stehen. So können z. B. Einzeller als Modellsysteme benutzt werden, da sie von Natur aus einfachste Antriebs- und primitivste Steuerungssysteme haben. Ein Beispiel hier für ist das *Paramecium caudatum*.

Wir wollen aber keine Nanomaschinen bauen, sondern Zielsetzung unserer Jugendforschungs-Arbeit ist es, von dem *Paramecium caudatum* zu lernen, wie man Nanomaschinen in Flüssigkeiten steuern kann.

2.Theorie:

2.1. Ciliaten

Ciliata sind heterotrophe Lebewesen die mit Plasmafortsätzen (Cilien) bedeckt sind, welche der Steuerung und Fortbewegung der Zellen im Wasser dienen. Zudem erzeugen sie Strömungen die zum Transport von Nahrungspartikeln beitragen. Diese Lebewesen sind meist Einzeller. Cilien können jedoch auch bei Vielzellern auftreten. Wichtig für uns ist der Einzeller Paramecium, bekannter unter dem Namen Pantoffeltierchen. Er gehört der Gattung der Ciliata an; d.h., er ist ebenfalls von Cilien bedeckt. Am Fußende besitzen Paramecien verlängerte Cilien welche schon flagellenähnlich sind. Die Cilien schlagen metachron im Wasser, und sind in einen Progressiven- (rechtsdrehenden) und einen Rückhol- (linksdrehenden) Schlag gegliedert. Durch diese Tatsache erlangt das Pantoffeltierchen insgesamt eine linksschraubende Drehbewegung.

2.1.1. Anatomie

Die Anatomie der Zelle selber verleiht ihr den Namen, da sie die Form eines Pantoffels beschreibt. Paramecien zählen zu den großen Zellen ihrer Art (etwa 40-100µm), daher ist die Struktur im Inneren der Zelle schon recht komplex: Paramecium enthält zwei kontraktile Vakuolen, welche Wasser aus dem Zellkörper pumpen. Sie sind jeweils oben und unten in der Zelle gelegen. In der Mitte des Paramecium befinden sich der Großkern und der Kleinkern. Hinzu kommt ein großer Mundapparat, welcher in drei verschiedene Bereiche gegliedert ist: Das Peristom, das Vestibulum und das Cytostom. Nahrungsvakuolen werden am Cytopyge ausgeschieden. Das schmale Ende der Zelle ist das Vorderende des Paramecium, das dickere Ende ist der Zellfuß.

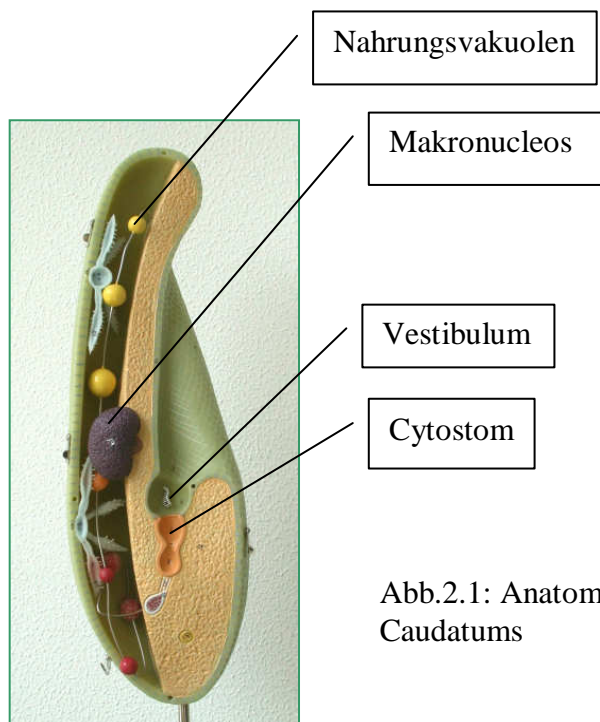


Abb.2.1: Anatomie des Parameciums Caudatum

2.1.2 Verhalten

Ingestion: Hauptnahrung von Paramecien sind Bakterien; aber auch kleine Pflanzenreste werden von Paramecien herangestrudelt.

Fortpflanzung: Wie bei vielen Einzellern ist auch bei Paramecien eine ungeschlechtliche Fortpflanzung möglich. Während diesem Prozess liegt eine mehrmalige Teilung des Kleinkerns vor. Der Großkern wird durchschnürt und schließlich teilt sich der gesamte Zellkörper. In der Natur treten nie verschiedene Parameciumarten gemeinsam in einem Gewässer auf. Das liegt vor allem daran, dass die Arten sich gegenseitig verdrängen. In angesetzten Kulturen nimmt nach geringer Zeit eine Art überhand. Paramecien sind nur in Süßwasser anzutreffen, hauptsächlich dann, wenn diese reich an Bakterien sind. Aus diesem Grund sind sie auch in Kläranlagen als nützliche Helfer zu finden.

2.2 Der Cilienapparat

Wie bereits in Kapitel 2.1 erwähnt, bewegen sich die Paramecien mit Hilfe von Cilien fort. In diesem Kapitel wollen wir näher auf den Aufbau und die Funktionsweise der Cilien eingehen.

2.2.1 Aufbau

Allgemein

Cilien und Flagellen unterscheiden sich nur durch die Länge der Antriebsorganelle. Der Antriebsmechanismus der Cilien besteht aus röhrenartigen Strukturen. Dabei besteht er aus einem Stator und einem Rotor. Der Stator besteht aus 9 „Duplets“, welche eine Verbindung von zwei unterschiedlichen Röhren darstellt. Diese Röhren sind wiederum kreisförmig angeordnet und werden durch sogenannte Nexine (siehe Abb.2.2) untereinander verbunden. Die Duplets unterteilen sich in den A-Tubulus und den B-Tubulus. An dem A-Tubulus befinden sich Denylin-Arme, die entgegen des Uhrzeigersinns ausgerichtet sind. Die Denylin-Arme sind die kraft erzeugenden Strukturen. In Kapitel 2.2.2 werden wir später genauer darauf eingehen. Der Rotor besteht aus einem zentralen Doppeltubuli, der von zwei geteilten Scheiben umgeben ist. Der Rotor und der Stator sind durch Radialspeichen miteinander verbunden. Diese Struktur setzt sich fort bis zur Verankerung, dem Basalkörper in der Zelle. Dort liegt jedoch eine Veränderung vor. Statt den Duplets sind Tripplets vorhanden und es zudem liegt kein Rotor mehr vor. Außerdem fehlen die Radialspeichen und die Denylin-Arme.

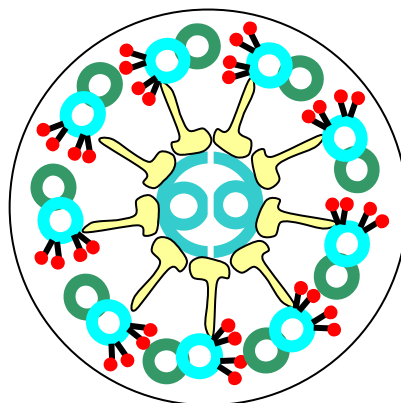


Abb. 2.2: Cilienapparat nach Hausmann

Fehler!

Komplexerer Aufbau

Da mit dem Modell von Hausmann nicht so gut die Funktionsweise erläutert werden kann und der Aufbau wesentlich komplizierter ist, möchten wir an dieser Stelle das sogenannte F_0F_1 -Modell einführen. Der F_0F_1 -Komplex stellt eine Unterstruktur der Duplets dar. Dieser Komplex kann noch in zwei Untereinheiten eingeteilt werden. Die F_1 -Einheit stellt dabei den wesentlichen Motorkomplex dar und die F_0 -Einheit die Versorgungseinheit des Motors. Die F_1 -Einheit besteht wiederum aus 5-Untereinheiten (α , β , γ , δ und ϵ), die die $\alpha_3\beta_3\gamma\delta\epsilon$ -Struktur bilden. Die α - und β -Einheiten stellen zusammen wiederum ähnliche Strukturen dar wie die Duplets. Der Rotor dieser Unterstruktur besteht in diesem Modell aus γ und ϵ . Da die δ -Einheit mit dem F_0 -Komplex zutun hat, werden wir erst später deren Bedeutung erklären. Der F_0 -Komplex mit der Struktur ab_2c_{12} besteht aus drei verschiedenen Einheiten mit den Bezeichnungen a, b und c. Die Einheiten a und c des F_0 -Komplex stellen das Membransystem dar, das zur Protonentranslokation zwischen den Duplets gedacht ist. Die b-Einheit dient zusammen mit der δ -Einheit in dem Komplex $b_2\delta$ mit als Stator.

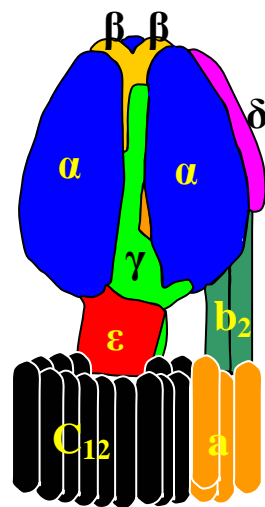
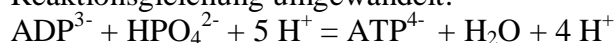


Abb. 2.3:
Aufbau des F_0F_1 -Komplexes

Funktionsweise

Die Funktionsweise der Antriebsorganellen beruht auf der F_0F_1 -Synthase. Dabei wird davon ausgegangen, dass durch die Umwandlung von ATP-Derivaten ein Protonenfluß im a-c-Komplex entsteht, der den Rotor antreibt. Der Rotor dreht sich wegen der Elektrostatik des Protonenflusses in dem Membransystem. Der Protonenfluss beruht auf der Umwandlung der ATP-Derivate und den Konformationsänderungen. Um dies genauer zu erläutern zu können, ist es nötig zwischen den zwei Funktionsarten zu unterscheiden, die ATP-Synthese und -Hydrolyse. Grundsätzlich werden die ATP-Derivate an den Duplets nach der folgenden Reaktionsgleichung umgewandelt:



Am besten eignet sich das „binding change“-Modell von Paul Boyer zur genaueren Erklärung des Protonengradientens.

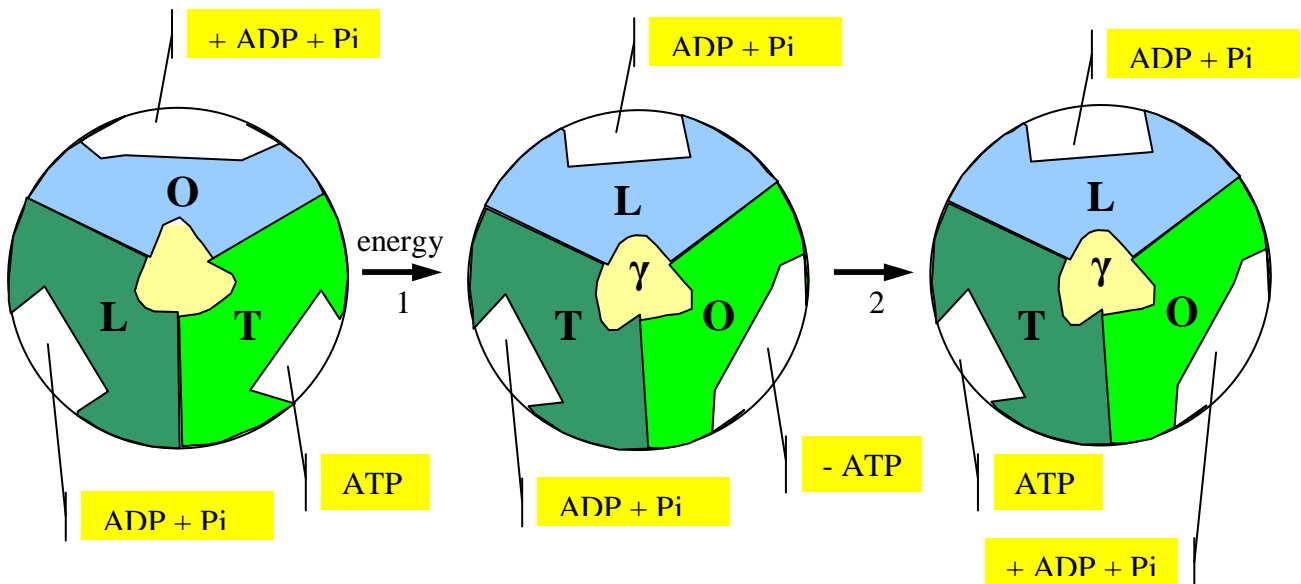


Abb. 2.4: Binding-chance-Modell nach Paul Boyer

Dabei werden die Duplets in drei Bereiche eingeteilt. Im Modell der F_0F_1 -Synthase geht man dabei von den drei katalytischen β -Stellen aus. Die Bindungsstellen besitzen verschiedene Bindungsaffinitäten für die ATP-Derivate (Tight, Open, Loose). Durch die Konformationsänderungen, die auf der Verschiebung des Membrankomplexes beruht, wechseln die Affinitäten sequentiell zwischen den Bindungsstellen. In der offenen Bindungsstelle wird kein Stoff gebunden. An der festen Stelle wird das ATP fest gebunden und kann erst durch eine Konformationsänderung abgegeben werden. An der „losen“ Seite wird das ADP umgewandelt.

Wie schon erwähnt wird zwischen der ATP-Synthese und -Hydrolyse unterschieden. Beides unterscheidet sich in der Reaktionsrichtung und auch, bezogen auf den Cilienapparat, auf die Drehrichtung. Den Mechanismus hat sich bezogen auf die ATP-Synthese folgenderweise vorzustellen. In Schritt eins wird in der offenen Seite ADP + P_i hinzugegeben. In Schritt 2 wird in Folge der Konformationsänderung ATP an der hellgrünen Seite abgegeben und anschließend reagiert das ADP wegen der erhöhten Affinität zu ATP. Bei der ATP-Hydrolyse läuft dies umgekehrt ab. Bei Paramecien läuft logischerweise die ATP-Hydrolyse im Normalfall ab, da dass durch die Verdauung der Nahrung erzeugte ATP zersetzt wird.

Durch den F_0F_1 -Komplex wird wiederum der B-Tubulus der Duplets angetrieben. An dem sich der Deneyin-Arm bewegt. Durch Verhackung von den verschiedenen Deneyin -Armchen zwischen den Duplets, kommt es zu abwechselnden Streckungen und Erschlaffungen der Duplets. Dadurch wird das mittlere Duplet, das den Rotor darstellt, bewegt.

3. Material und Methoden

3.1 Kulturen

Wie an unserer Schule üblich, benutzten wir zur Kultivierung der Protozoen anfangs einen Heuaufguss. Die Kultivierung der Paramecien verlief soweit ganz gut. Einziger Nachteil war der sich schnell ausbreitende Zersetzungsgeruch der Bakterien. Dies lag vor allem an der Übermenge Heu. Zu viel Heu beansprucht fast den gesamten Sauerstoff und lässt die Paramecien ersticken. Hinzu kam, dass wir das Heu nicht abkochten und so eine Vielzahl von Einzellern und Bakterien erhalten blieb. So wurde auch diese Idee verworfen.

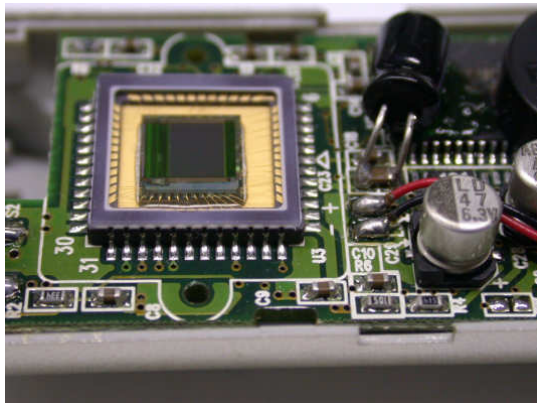
Schließlich dann die Optimallösung: Weizenstroh. Wir haben es vorerst mehrere Stunden gewässert und dadurch Düngerrückstände entfernt. Durch Abkochen haben wir dann die Einzeller und die meisten Bakterien abgetötet. Dankenswerterweise erhielten wir vom Biologischen Institut in Frankfurt eine Reinkultur *Paramecium caudatum*, was vor der bevorstehenden Kälteperiode recht günstig war. In einem Erlenmeyerkolben wird der abgekochte Strohsud mit destilliertem Wasser und einigen Strohresten gegeben. Nachdem die Temperatur im Kolben auf ca. 35°C gesunken ist, werden einige Milliliter Reinkultur hinzugefügt. Die Paramecien vermehren sich und innerhalb von einigen Tagen bildet sich eine weißliche Wolke an der Oberfläche. Diese Kultur hält ca. 4-6 Wochen, anschließend muss der Überimpfungsvorgang wiederholt werden.

Für unsere Versuche ist eine konzentrierte *Paramecium*flüssigkeit notwendig, um auf möglichst kleinem Raum möglichst viele Paramecien beobachten zu können. Eine simple Methode ein Konzentrat zu erlangen ist das Verwenden von Aquariumwatte. In den Kolbenhals wird ein lockerer Wattestopfen gegeben. Die Paramecien streben zur sauerstoffreichen Oberfläche hin und durchdringen die Watte. So sind sie oberhalb des Wattestopfens konzentriert und können direkt verwendet werden.



Abb. 3.1: Unsere Kultur

3.2 Beobachtungsapparatur



a)

Abb. 3.2: a) CCD-Chip



b)

b) Webcam mit Aquarium

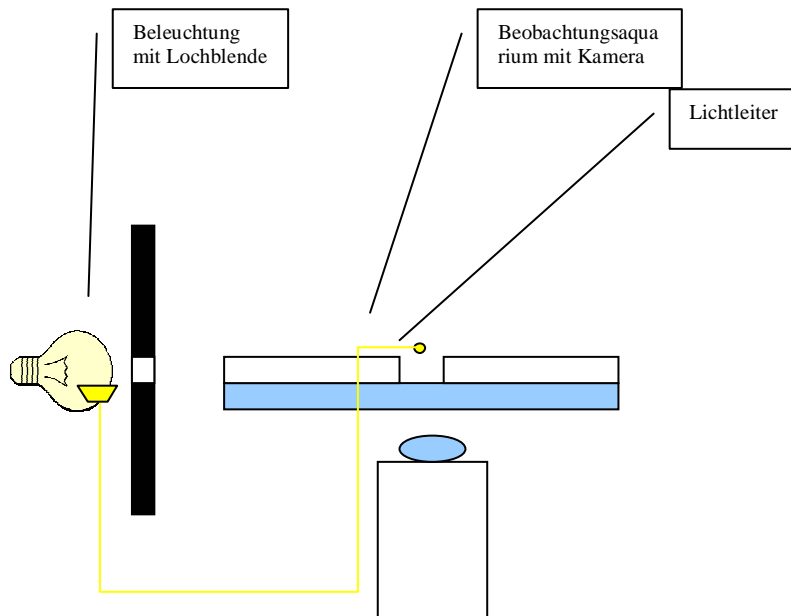
In der Theorie ist alles viel einfacher als in der Praxis. So verschwanden die Paramecien unter dem Mikroskop immer aus unserem Blickfeld, besonders dann, wenn wir sie hell beleuchteten. Wir wollten die Paramecien aber auch nicht durch Kleister in ihrer Bewegung hemmen. So mussten wir uns eine neue Beobachtungsmethode ausdenken. Wir bauten ein CCD-Chip-Aquarium. D. h., wir ließen die Paramecien auf den CCD-Chip einer preiswerten Webcam schwimmen. So blieben sie stets – wenn auch klein – beobachtbar.

Bei der Untersuchung der Bewegung der Paramecien in einem Gradienten ist es oft nicht erforderlich, dass das ganze Aquarium beobachtet wird. Bei dichtem Besatz genügt es, wenn man die Breite des Aquariums überblicken kann um eine Aussage über die Bewegung der Paramecien im Gradienten machen kann (s. Abb. 3.2). Bei beiden Fällen wurden die Paramecien von der Seite beleuchtet. So konnten sie im Streulicht vor dem dunklen Hintergrund sehr gut beobachtet werden.

3.3 Versuchsaufbauten

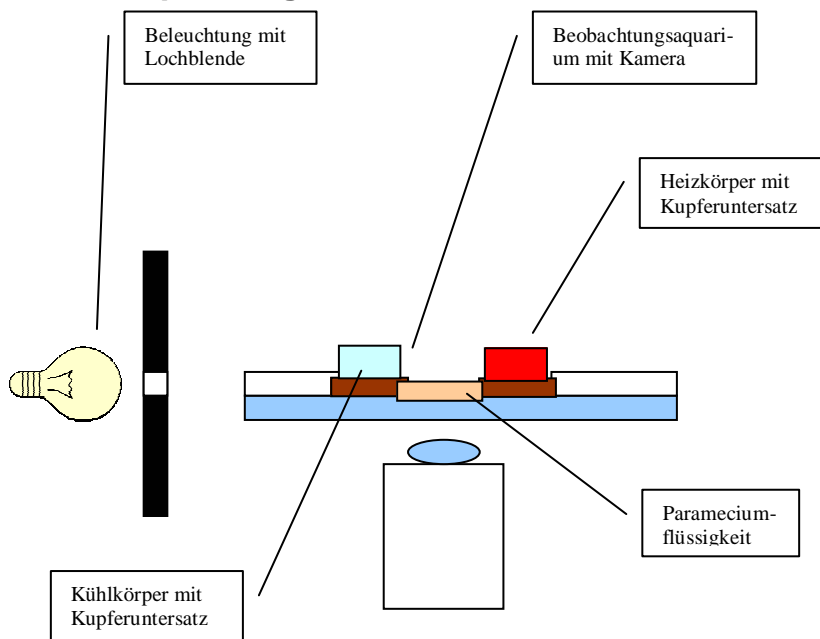
Um das Verhalten der Paramecien unter verschiedenen Umwelteinflüssen zu untersuchen, wurden sie in den folgenden Aufbauten verschiedenen Gradienten ausgesetzt. Diese Versuche sollen zur Aufklärung der Steuerungsapparats beitragen

3.3.1 Lichtgradient



Dieser Versuch soll das Verhalten der Paramecien bei Lichteinfluss zeigen. Für den Versuch wurde die in Kapitel 3.2 erläuterte Beobachtungsapparatur mit dem in der Abbildung zusehenden Aquarium verwendet. Die optische Achse wird dabei mittelstark beleuchtet. In einem rechten Winkel zu der Beleuchtung ist der Lichtleiter angebracht, der mit einer hohen Intensität strahlt.

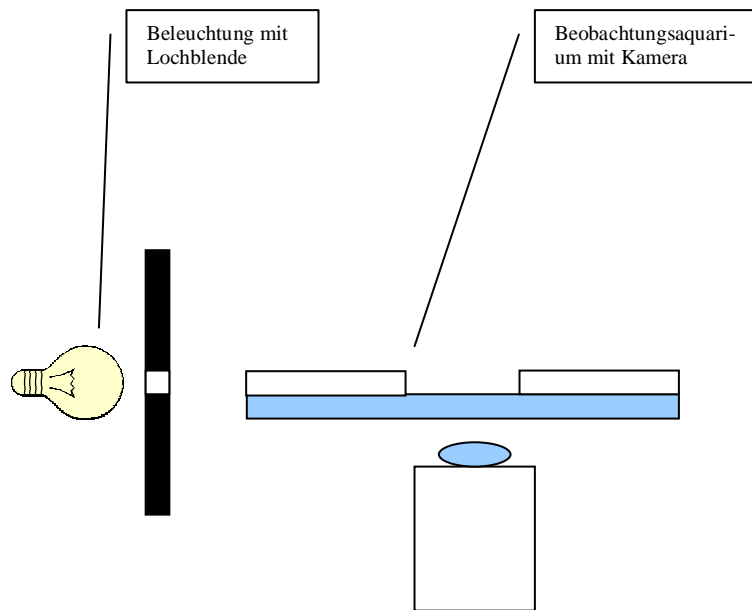
3.3.2 Temperaturgradient



Wie in der Abbildung ersichtlich ist, wurde ein Aquarium mit Heiz- und Kühlelement eingesetzt um einen Temperaturgradienten zu erzeugen. Bei den Versuchen wurde entweder

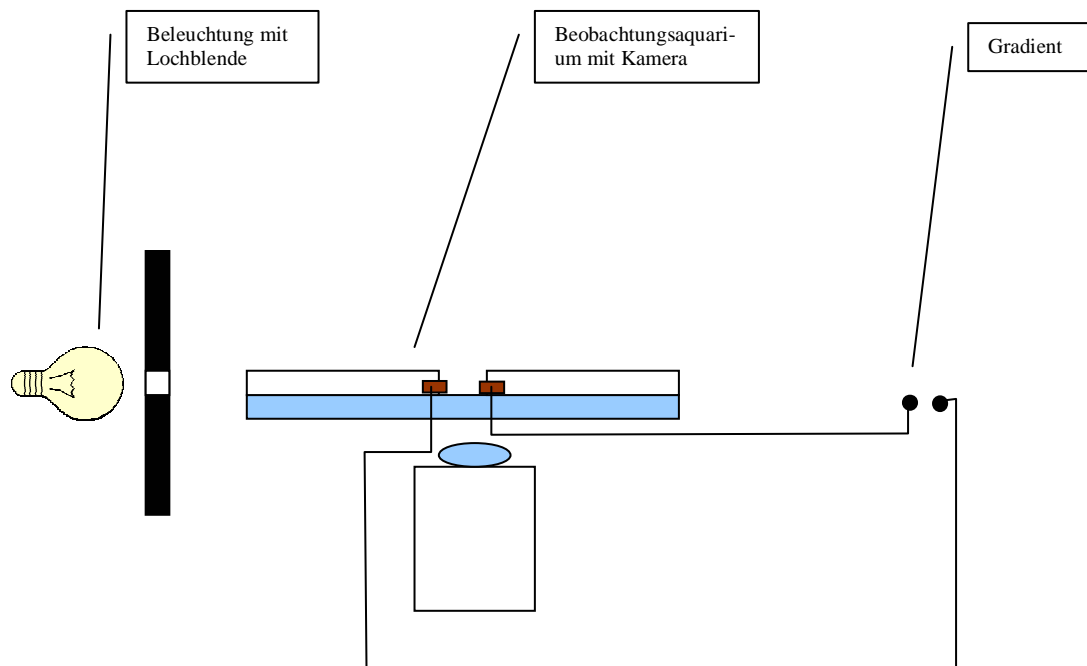
das Kühl- oder das Heizelement verwendet um einen exakteren Gradienten verwenden zu können.

3.3.3 Chemischer Gradient



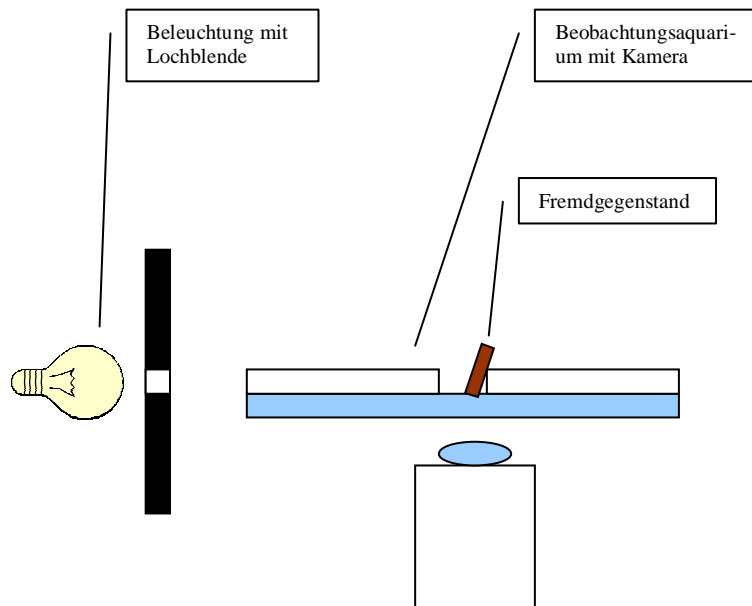
Bei diesem Versuch wurde ein etwas breiteres Aquarium eingesetzt, um das Einstellen des Gradienten zu verzögern. Als Chemikalien wurden HCl, NaCl, NaOH, KCl und $\text{Ca}(\text{Cl})_2$ eingesetzt. Die Salze wurden alle in Wasser gelöst und hatten eine Konzentration von 0,5 Mol/l. Die eingesetzte Natronlauge hatte eine Konzentration von 1 Mol/l und die Salzsäure eine Konzentration von 0,5 Mol/l.

3.3.4 Elektrizität



In diesem Versuch wird, wie in der Zeichnung ersichtlich ist, ein Aquarium mit zwei Elektroden verwendet. An die Elektroden wurde eine Gleichspannung angelegt.

3.3.5 Fremdgegenstände



Bei diesem Versuchsaufbau wird das Standardaquarium verwendet. An einer Seite wurde eine Nadel oder ein Wollfaden befestigt.

4. Ergebnisse

4.1 Lichtgradient

Die Versuchsorganismen waren regelmäßig verteilt bevor der Gradient eingestellt wurde. Nachdem der Gradient eingestellt war, schwammen sie zum Licht, aber näherten sich nicht ganz dem Lichtleiter. Bei einem ähnlichem Versuch unter dem Mikroskop wurde dieses Verhalten bestätigt.

4.2 Temperaturgradient

Bei dem Versuch mit der Wärmequelle schwammen die Versuchsorganismen erwartungsgemäß zur kälteren Seite. Bei dem Versuch mit der Kältequelle schwammen die Versuchsorganismen zur wärmeren Seite.

4.3 Chemischer Gradient

Bei der Zugabe von KCl zeigte sich nach relativ kurzer Zeit eine erhöhte Aktivität der Paramecien, d. h. sie bewegten sich deutlich schneller. Später, begannen sich die Versuchsorganismen an der Querachse zu drehen.

Bei der Zugabe von Salzsäure zeigte sich, dass die Paramecien den Bereich mit erhöhten Säurekonzentration meideten und sich negativ zu dem Gradienten verteilten.

Bei dem Versuch mit dem NaOH-Gradienten verteilten sich die Paramecien entsprechend dem Gradienten. Das heißt die Organismen suchten den Bereich mit der höchsten Konzentration auf.

Bei dem Versuch mit CaCl_2 zeigte sich kein eindeutiges Verhalten, abgesehen davon, dass sich die Paramecien etwas schneller bewegten. Das Ergebnis war, dass die Paramecien relativ schnell starben.

4.4 Elektrizität

Mit zunehmender Spannung verteilten sich die Organismen in dem Bereich mit dem Minuspol der Spannung. Bei einer Spannung von etwa 0,6V erhöhte sich die Aktivität der Paramecien. Bei 1,2V stieg die Aktivität wiederum an und bei 3V bewegten sich alle Paramecien relativ schnell zum Minuspol.

4.5 Fremdgegenstand

Bei der Watte prallten einige Paramecien an der Watte ab und versuchten wieder die Watte zu überwinden. Jedoch nach kurzer Zeit schwammen einige unter dem Faden hindurch. Bei der Nadel kam das gleiche Ergebnis heraus.

5. Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass sich die Paramecien relativ leicht durch äußere Umweltreize beeinflussen lassen. So zeigte sich, dass einige Umweltreize zu Vermeidungsreaktionen bei den Versuchsorganismen führten. Dies hängt höchstwahrscheinlich mit den Ionenkanälen und -pumpen zusammen. Bei den Paramecien kommen überwiegend Na^+/K^+ -Pumpen vor. Diese Pumpen stoßen mit Hilfe von ATP pro Zyklus drei Na^+ aus und saugen K^+ in die Zelle. Dadurch entsteht ein Potential, das von der Konzentration der jeweiligen Ionen im extra- und intrazellulären Raum abhängt. Diese Potentiale können zum Transport von Stoffen und auch zur Umweltwahrnehmung genutzt werden. Wenn sie zur Umweltwahrnehmung genutzt werden, wird die Potentialschwankung für die Aussendung einer Amplitude genutzt.

Bei den Versuchen mit den chemischen Gradienten, haben die Konzentrationsänderungen der Chemikalien im extrazellulären Raum somit auch zu den Potentialänderungen geführt. Bei den eingesetzten Salzen führte dies mit Ausnahme von KCl und CaCl_2 zu Vermeidungsreaktionen, da der extrazelluläre Raum stärker positiv geladen ist als vorher. Dadurch nimmt das Potential ab. Wahrscheinlich meiden die Paramecien höhere Konzentration von Salzen und Hydroniumionen, weil dadurch der Ionenhaushalt ihrer Zelle durcheinander gerät. Bei dem KCl-Gradienten führten die erhöhte Konzentration von K^+ -Ionen vermutlich zu einer Störung der Ionenpumpen oder des Ionenhaushaltes. Die Membranen von Ionenkanälen oder -pumpen sind besser permeabel für K^+ als für Na^+ -Ionen. Dadurch könnte es durch einen zu starken Durchlass von den K^+ zu einer Auflösung des Membranpotentials führen. Eine andere Möglichkeit wäre, dass die Ionenpumpen das Potential nicht mehr kontrollieren können, da der extrazelluläre Raum zu stark positiv geladen ist und da die Ionenpumpe dies nicht ausgleichen können, weil die K^+ -Ionen fast ausschließlich die positive Ladung ausmachen. Wegen der Störung der Umweltwahrnehmung bewegt sich das Paramecium untypisch. Über den Versuch mit dem CaCl_2 -Gradienten kann keine vernünftige Deutung gemacht werden, da außer dem Sterben der Organismen keine Beobachtungen gemacht werden konnten. Dies muss im weiteren noch weiter untersucht werden. Bei dem Versuch mit dem NaOH-Gradienten verteilten sich die Paramecien gemäß des Gradientes, da durch die Lauge die Konzentration der Hydroniumionen herabgesetzt wurde. Deswegen wurde die Ladung des extrazellulären Raumes negativer. Wahrscheinlich ist der Aufbau des Potentials für die Paramecien leichter in einem leicht alkalischen Terrain.

Bei dem Versuch mit dem Elektrizitätsgradienten, können auch die Ionenpumpen zur Deutung verwendet werden. Das entstehende elektrische Feld sorgt für eine Ladungstrennung der Ionen, wodurch die Kationen zur Kathode wandern und die Anionen zur Anode. Die Paramecien orientieren sich vermutlich zum negativen Pol hin, weil das Paramecien dort besser ihr Potential ausgleichen können, da dort der extrazelluläre Raum negativer geladen ist.

Die Lichtwahrnehmung der Paramecien erfolgt über Photorezeptoren. Diese funktionieren vermutlich auch über einen Gradienten oder über ein Potential. Die Photonen regen Ionen oder Elektronen in den Photorezeptoren an, wodurch ein Potential entsteht. Durch das Potential kann das Paramecium Licht wahrnehmen. Das Verhalten lässt sich leicht daraus erklären. Die Paramecien meiden zu starkes Licht, da dadurch die Photorezeptoren überfordert werden.

Das Verhalten bei den Versuchen mit dem Temperaturgradienten hängt wahrscheinlich damit zusammen, dass verschiedene Rezeptoren für Wärme und Kälte an der Zelle vorhanden sind. Vermutlich kommen Sensoren für den maximalen und den minimalen Temperaturbereich vor. Wie die Versuche mit den Fremdgegenständen zeigten, schwammen die Paramecien gegen den Fremdgegenstand und schwammen wieder ein Stück zurück. Dann versuchten die Versuchsorganismen es erneut. Aus diesem Verhalten lässt sich schließen, dass das Paramecium Druckrezeptoren am vorderen Ende besitzen muss. Über ihre Funktionsweise können wir zu dem Zeitpunkt noch nicht viel aussagen.

(evtl. Tuscheversuch)

6. Empfehlungen zum Bau von Nanomaschinen

Für den Bau von Nanomaschinen müssen viele Aspekte des Antriebes und der Steuerung beachtet werden. Da Nanomaschinen nicht per Funk ferngesteuert werden können und auch wegen des Platzmangels nicht über Mikrochips gesteuert werden können, bleibt nur noch die Steuerung über Gradienten übrig. Solche Gradienten können nur mit Hilfe von physikalischen Einflüssen (elektrisches Feld, Licht) und Konzentrationsgefällen von Chemikalien erfolgen. Deswegen ist es empfehlenswert sich von der Natur beim Bau inspirieren zu lassen und dabei auf Nachbauten biomolekularer Lösungen zu setzen. Die ideale Lösung wäre natürlich ein kompletter künstlicher Nachbau der Mechanismen des Antriebes und der Steuerung. Dies müsste jedoch mit ingenieurischer Meisterleistung erfolgen und dieses Ziel steht wegen des nötigen Know-how noch in weiter Ferne.

Deswegen empfehlen wir die Verwendung von ganzen Einzellern oder Einzellerteilen. So ergeben sich zwei mögliche Modelle. Dies wird nach unserer Meinung auch schon in wenigen Jahren mit Hilfe der Biotechnologie möglich sein. Eine Möglichkeit wäre mit Hilfe von Einzellerteilen wie dem Cilienapparat und den verschiedenen Rezeptoren eine Nanomaschine zu bauen. Der Nachteil dieses Modells ist jedoch, dass sich der Motor nur noch in eine Richtung drehen kann, wenn der F_0 -Komplex nicht wieder ganz her gerichtet wird. Trotzdem könnte solch eine Nanomaschine für vielfältige Zwecke eingesetzt werden. Die andere Möglichkeit ist einen manipulierten Einzeller zu verwenden, den man mit den passenden Rezeptoren ausstattet. Die Steuerung der Organismen erfolgt dabei über Gradienten. Wie dies funktioniert, haben wir im Rahmen unserer Forschungsarbeit gezeigt. So können Gradienten wie Lichtintensitäten, das elektrische Feld oder auch chemische Gradienten optimal für die Steuerung eingesetzt werden. Um nun Einzellern steuern zu können, muss sich das Medium, indem sich die Organismen befinden, in einem Gefäß befinden, dass die Gradienten selber herstellen kann. Dies ist jedoch bei vielen Verwendungszwecken nicht störend. So könnte mit dieser Lösung zahlreiche Anwendungsgebiete in der Medizin, beim Filtern oder dem Transport von Mikropartikeln und so weiter revolutioniert werden. So können fast alle Bereiche der Nano- und Mikrotechnologie abgedeckt werden.

7. Rückblick und Ausblick

Im Rahmen unserer Forschungsarbeit haben wir das Verhalten des *Paramecium caudatum* bei verschiedenen Gradienten untersucht und ihren komplexen Antrieb näher betrachtet. Des Weiteren haben wir versucht die Umweltwahrnehmung des *Paramecium* besser zu verstehen. Wir haben mit Hilfe von unseren neuen Erkenntnissen und den Ergebnissen unserer Untersuchungen zudem eine Empfehlung zum Bau von Nano- oder Mikroorganismen aufgestellt. Bis zum Wettbewerb werden wir unsere Untersuchungen ausweiten um ihre Genauigkeit zu überprüfen. Außerdem werden wir versuchen mit unserem Wissen ein präsentierbare Modell bis zum Wettbewerb zu entwickeln.

Mit Nanomaschinen könnte man, wie schon in der Einleitung erwähnt, viele Bereiche der Technik in schon wenigen Jahren revolutionieren.

8. Literaturangaben

Verfasser	Titel	Jahr	Ort
Schwarz, Steffen	Untersuchungen zu invasionspezifischen Proteinen von <i>Holospira obtusa</i> , einem Bakterium aus dem Makronukleus von <i>Paramecium caudatum</i> .	2002	Biologisches Institut der Universität Stuttgart
Bechert, Jan	Ophryoglena flava: Reaktionen auf Schwerkraft und Licht	2004	Universität Bonn

Links:

www.life.uiuc.edu/crofts/bioph354/lect10.html

9. Dank

Wir danken Herrn Prof. H. P. Klein von der Johann Wolfgang Goethe Universität, Frankfurt am Main, für die kostenlose Bereitstellung einer Reinkultur von *Paramecium caudatum*.