

## **Anschauliche Mechanik: Vortrieb von Wassertieren**

Beate Plinninger, A. Rachel, Hartmut Wiesner, Alfred Ziegler\*

Universität München, \*Universität Frankfurt

Überarbeitet erschienen in: Naturwissenschaften im Unterricht, 2005, S.26

### **Zusammenfassung**

Die Mechanik wird von den meisten Schülerinnen und Schülern als besonders trocken und langweilig empfunden. Es fehlt ihnen im Unterricht nicht nur der Alltagsbezug, sondern auch der Neuigkeitsaspekt. Die Untersuchung der Frage, wie Fische und andere Meerestiere sich fortbewegen, bietet das Potential, diesen Mängeln entgegenzutreten. Allerdings stellt die Komplexität der physikalischen Verhältnisse hier besonders hohe Anforderungen an die didaktische Reduktion: der Sachverhalt muss für die Schüler nachvollziehbar bleiben, ohne dass man den wesentlichen Kern der Erklärung mit entsorgt. Es wird ein entsprechendes, medial unterstütztes Unterrichtskonzept vorgestellt und über die Erfahrungen bei seiner Umsetzung berichtet.

### **1. Einleitung**

Zielsetzung des hier vorgestellten Unterrichtskonzepts ist es, Schülern Sachverhalte der Mechanik in einer Form zu präsentieren, die nicht nur Bezug zum Alltag, sondern auch Herausforderungscharakter hat, insofern, als sie nicht einfach durch Anwendung fertiger, bereits im Unterricht erarbeiteter oder im Schulbuch ausgearbeiteter Formeln, schnell erklärt werden können. Dadurch bietet sich die Möglichkeit, den Schülern einen eigenen Gestaltungsraum zu eröffnen, statt ihnen das Gefühl zu vermitteln, dass sie nur Statisten in einem von der Lehrkraft entworfenen, geradlinigen Plot sind. Dieser Gestaltungsraum ergibt sich aus der physikalischen Komplexität des Themas, die ihrerseits wiederum Probleme aufwirft. Da ist zum einen die Frage, ob dieses Thema aus der für ihre Schwierigkeit berüchtigten Hydrodynamik überhaupt didaktisch reduziert werden kann, ohne zu inkorrekten Erklärungen zu greifen. Zum anderen besteht die Gefahr, dass die Schüler gerade auf Grund der Komplexität die Orientierung und damit auch ihr Interesse verlieren. Darüber hinaus ist noch ein weiterer Aspekt von Bedeutung: Das Thema unterscheidet sich von den in der Regel unter dem Stichwort „Anwendungen“ präsentierten Beispielen, indem es sich nicht um eine technische Anwendung, sondern um das Verständnis von Naturvorgängen handelt. In den Untersuchungen der geschlechtsspezifischen Unterschiede im Bezug auf den Physikunterricht gibt es deutliche Hinweise, dass Jungen eher an technischen Anwendungen d.h. Naturbeherrschung, Mädchen eher an Naturverständnis interessiert seien. Bei der unterrichtlichen Umsetzung dieses Themas bietet sich daher die Möglichkeit, diesen Aspekt einer erneuten Prüfung zu unterziehen.

Die nachfolgend beschriebenen Überlegungen für eine Umsetzung in einen Unterrichtsversuch basieren wesentlich auf der Zulassungsarbeit von B. Plinninger [1]. Von A. Rachel wurden ebenfalls in einer Zulassungsarbeit Programme für die Simulationen der drei Vortriebsbewegungen Rudern, Oszillation und Undulation der Fische geschrieben, die unter [www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Fundgrube/downloads](http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Fundgrube/downloads) abrufbar und zur Veranschaulichung im Unterricht eingesetzt werden können. [2]

Bei der Darstellung des Themas wurde als erster Schritt der Elementarisierung eine Klassifizierung nach den Bewegungsformen vorgenommen:

- Rückstoß pur,
- Rudern,

- Oszillation
- Undulation.

Bei den letzten drei Formen wurde vereinfachend angenommen, dass die Kraft auf einen bewegten Körperteil immer die gleiche Richtung wie die Bewegung hat, so wie der Rückstoß bei einem geworfenen Ball der Wurfrichtung entgegengesetzt ist. Diese Vorstellung ist zwar recht naiv (so gäbe es z.B. keinen Auftrieb am Flugzeugflügel, der quer zur Bewegungsrichtung wirkt), führt aber – wie die komplizierten Rechnungen der Aero- und Hydrodynamik zeigen – oft zu brauchbaren Ergebnissen.

Diese vier Bewegungsformen werden im folgenden einzeln besprochen.

## 2.1 Rückstoß pur

Dies ist der am leichtesten zu verstehende Fall: es wird Wasser eingesaugt und durch eine Art Düse wieder wie bei einer Rakete ausgestoßen. Beispiele dafür sind die Qualle und der Tintenfisch.

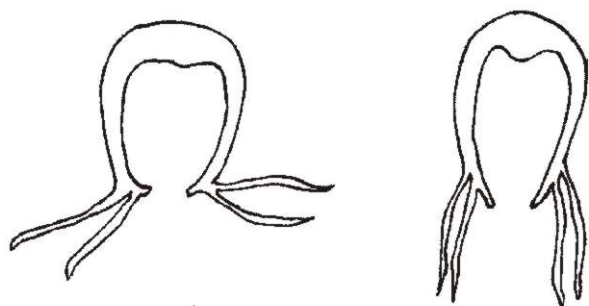


Abb. 1: Qualle in Füll- und Ausstoßphase

Der Vortrieb kann hier einfach als Rückstoß, wie er im Unterricht behandelt wurde, erklärt werden. Das einzige Problem ist, dass der Rückstoß beim Einsaugen den beim Ausstoßen gerade aufheben könnte (bei Tieren erfolgen Einsaugen und Ausstoßen auf der gleichen Körperseite, d.h. in entgegengesetzter Richtung). Ein Blick auf die Grundgleichung zeigt, dass das nicht der Fall ist.

Der Rückstoß ergibt sich als  $F = m\Delta v / \Delta t$ , wobei  $m$  die eingesogene bzw. ausgestoßene Masse des Wassers und  $\Delta v$  die der Wassermasse erteilte Geschwindigkeit ist. Die Beobachtung zeigt, dass die Zeitdauer  $\Delta t$  des Einsaugens praktisch gleich der des Ausstoßens ist. Die Masse  $m$  ist bei Einsaugen und Ausstoßen natürlich ebenfalls gleich. Der Trick ist, dass beim Einsaugen das Wasser aus allen Richtungen einströmt und beim Ausstoßen  $\Delta v$  wesentlich höher ist, was nur möglich ist, wenn das Ausstoßen in einer Art Düseneffekt durch einen wesentlich kleineren Querschnitt erfolgt als beim Einsaugen (sonst wäre die Masse ja schon nach kürzerer Zeit vollständig ausgestoßen).

## 2.2 Rudern

Grundidee bei dieser wie auch bei den anderen noch zu besprechenden Bewegungsformen ist der Gedanke des sich-Abstoßens vom Wasser. Zwar gibt Wasser nach, so dass der Effekt etwas beeinträchtigt wird, aber, wie jeder aus Erfahrung weiß, kann man z.B. durch die Bewegung der Hand Wasser in Bewegung setzen. Die Hand muss entsprechend den entgegengesetzten Impuls aufnehmen. Problematisch ist auch hier die Rückführung der sich bewegenden

Körperteile (rotierende Körperteile gibt es bei Vielzellern nicht), weil sie ebenfalls zu einer Kraft in der falschen Richtung führt.

Die Lösung besteht darin, dass das Körperteil jeweils verdreht wird, so dass es beim Schlag in der gewünschten Richtung dem Wasser die volle Fläche darbietet, beim Rückschlag jedoch die minimale Fläche (die Abb. 2 zeigt die Ruderbewegung eines Barsches in der Sicht von oben).

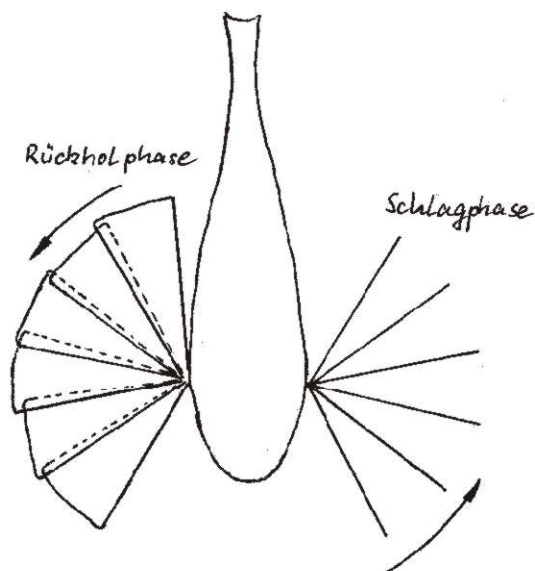


Abb. 2: Schematische Darstellung des Ruderns beim Barsch

Beim menschlichen Rudern ist natürlich keine Verdrehung erforderlich, weil der Rückschlag in der wenig Widerstand bietenden Luft erfolgt. Wie man an der Abbildung sieht, hat diese Art des Vortriebs allerdings einen Nachteil: die Kraft zeigt zum Teil nicht in die gewünschte Bewegungsrichtung. Dies führt zu Energieverschwendung und wird von Fischen deshalb in der Regel nicht zur dauerhaften Fortbewegung, sondern zu kurzfristigen, schnellen Manövern benutzt.

Die Ruderbewegung beim Barsch kann mit Hilfe des bereits angesprochenen Simulationsprogramms veranschaulicht werden. Die Betrachtungsperspektive und das Tempo der Ruderbewegung können variiert werden. In einem extra Fenster sind die Komponenten der Kraft auf die Flosse dargestellt, in Abhängigkeit von der Flossenbewegung und -stellung. Es kann zwischen kontinuierlicher Bewegung und schrittweiser Darstellung umgeschaltet werden.

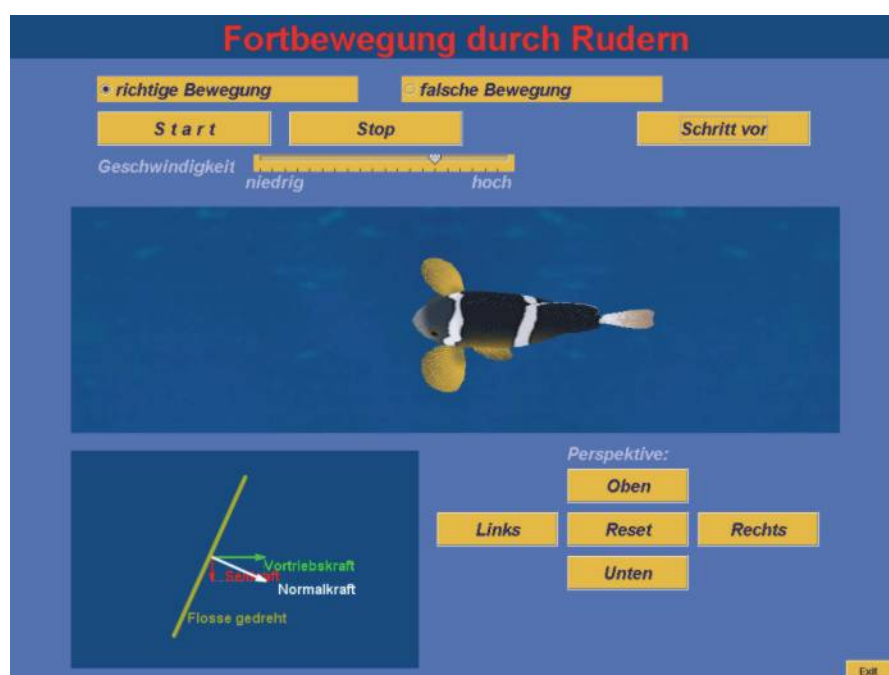
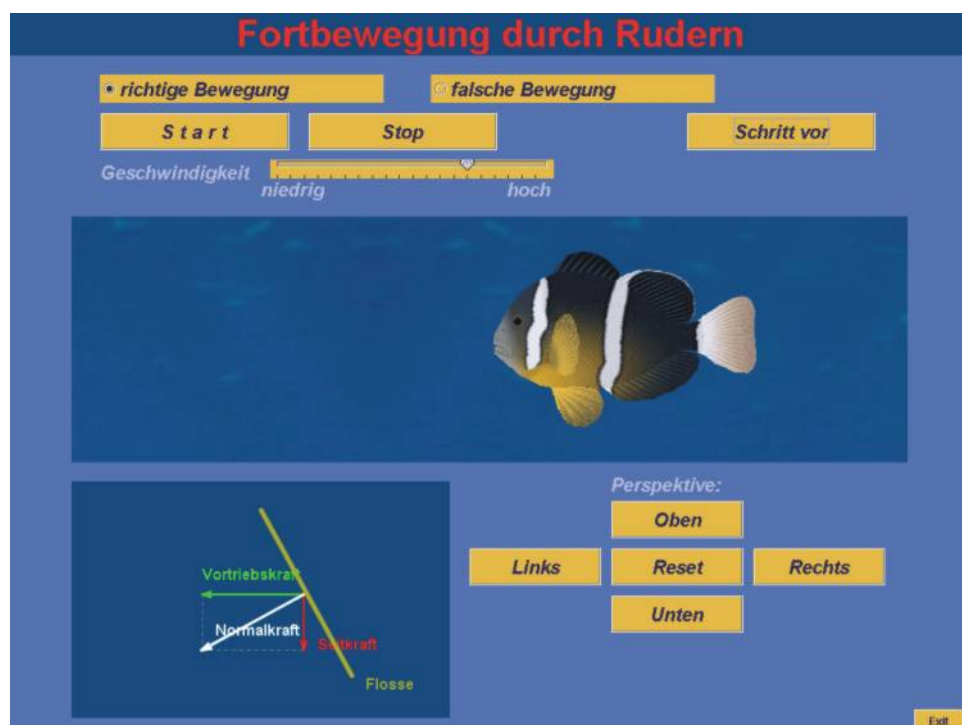


Abb. 3: Simulation der Ruderbewegung: Oben: Seitliche Betrachtung – Flossenbewegung nach hinten; darunter Draufsicht – Flossen gedreht und Bewegung nach vorne

### 2.3 Oszillation

Bei dieser Bewegung wird ein Körperteil, meist eine Flosse, hin- und herbewegt. Bei Meeressäugetieren ist das die vorherrschende Bewegungsform. Auch hier stellt sich das Problem, wie man verhindern kann, dass die bei der Bewegung auftretenden Kräfte sich gegenseitig aufheben (eine Verdrehung ist bei den meist massiven Flossen nicht möglich). Bei einer starren Flosse wäre das unter den hier gemachten Annahmen auch tatsächlich so. In der Realität hin-

gegen kommt es zu einem schwachen Vortrieb, z.B. bei einem Spielzeugfisch, der aber nicht die sehr effektive Fortbewegung etwa von Delfinen erklären kann.

Ein Hinweis ist das Verhalten einer Taucherflosse: Sie biegt sich bei Bewegung in der „falschen“ Richtung (Phase 1 in Bild 4) unter dem Wasserdruck zusammen und bietet damit dem Wasser einen kleineren Querschnitt dar, während sie sich bei Bewegung in der „richtigen“ Richtung (Phase 3 in Bild 4) auffaltet und gegen eine Verbiegung versteift.

Allerdings wäre bei dieser Bewegungsweise immer einer von zwei Schlägen wirkungslos.

Tatsächlich ist die reale Bewegung einer oszillierenden Flosse weniger extrem: sie verhält sich wie eine zweigeteilte Platte mit einem Scharnier, so dass der äußere Teil, der den Hauptteil der Kraft aufbringt, durch den Strömungswiderstand wegklappen kann. Eine Flosse unterscheidet sich aber insofern von einem passiven Scharnier, als der äußere Teil nicht vollständig wegklappt (dann gäbe es kaum eine Wirkung), sondern mit Muskelkraft in einer geeigneten Anstellung zur Strömung gehalten wird (siehe Abb. 4, Bewegung einer Forelle).

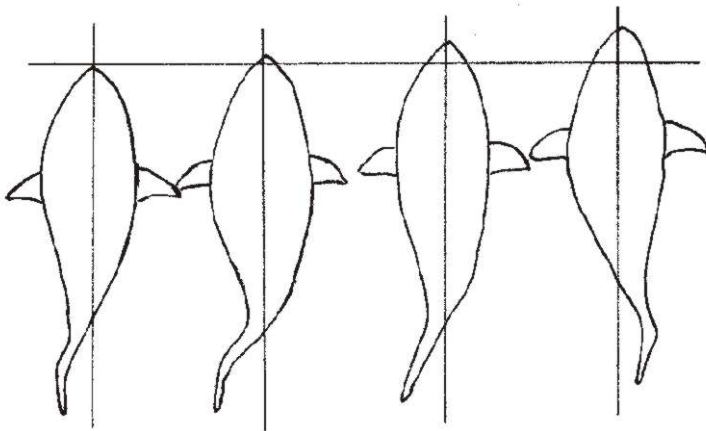


Abb. 4: Bewegungszustände bei der Forelle

In einem genaueren mathematischen Modell kann man diesen Effekt auch durch eine schlichte Phasenverschiebung, d.h. eine Zeitverzögerung in der Biegung der Flosse relativ zur Bewegung beschreiben.

In dem Simulationsprogramm ist die Bewegung des Delphins dargestellt. Auch hier kann man die Bewegung und die dabei wirkende Vortriebskraft kontinuierlich oder schrittweise verfolgen.

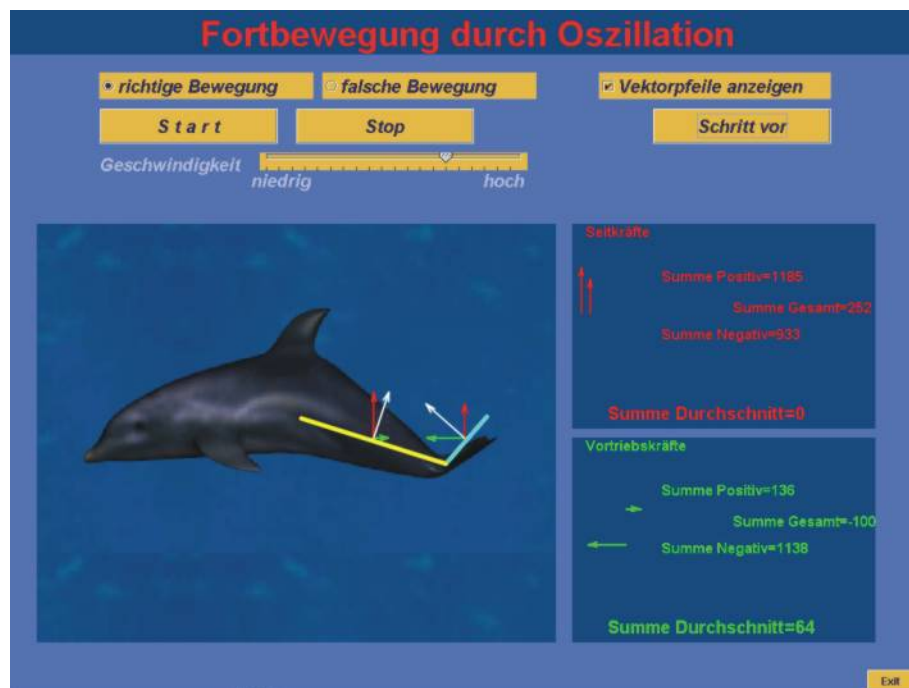


Abb. 5: Veranschaulichung der Vortriebskraft bei einem Delphin

## 2.4 Undulation

Diese Bewegungsform (siehe Abb. 6, Vorwärtsbewegung eines Aals) ist am schwersten zu verstehen, auch wenn die Simulation den zeitlichen Ablauf zu visualisieren hilft. Wie man an der Abbildung sieht, läuft eine Welle mit zum Schwanzende hin zunehmender Amplitude durch den Körper.

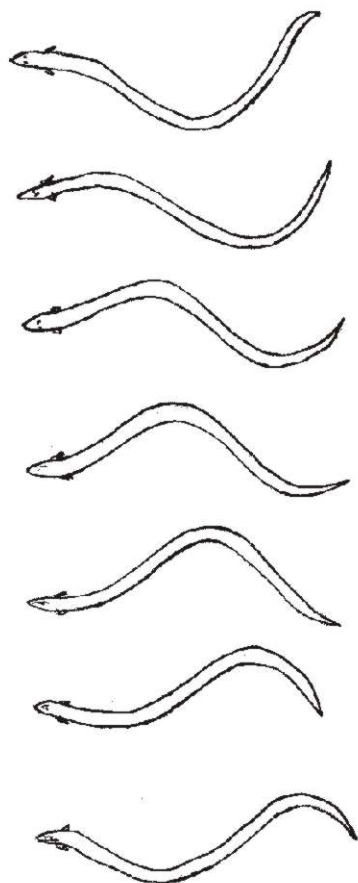


Abb. 6: Bewegungszustände beim Aal

Um zu verstehen, dass es sich auch hier um einen Abdrückeffekt handelt, ist es sinnvoll, von der Amplitudenzunahme abzusehen (sie hat im wesentlichen mit dem Wirkungsgrad der Fortbewegung zu tun). Dann ergibt sich das folgende vereinfachte Bild (vom Aal aus gesehen, d.h. von einem mit ihm mitbewegten Bezugssystem):

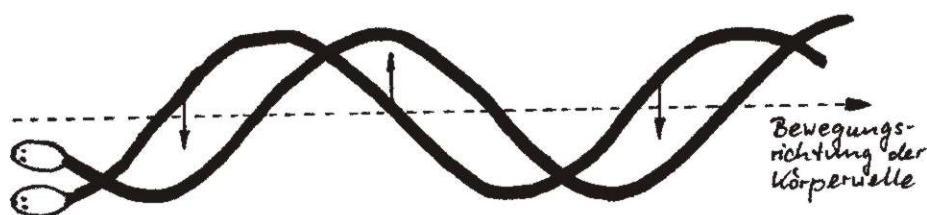


Abb. 7: Vereinfachte Darstellung der Undulation. Die Pfeile geben die Bewegungsrichtung der einzelnen Körperpunkte in Bezug auf das ruhend gedachte Wasser an. An jedem Punkt (außer den „Bäuchen“ und „Bergen“ der Welle) gibt es eine nach hinten gegen das Wasser gerichtete Kraftkomponente und damit nach dem Wechselwirkungsprinzip eine nach vorne gerichtete Kraft des Wassers auf den Fisch.

In dieser Darstellung läuft relativ zum Körper eine starre Welle nach hinten, so dass deutlich wird, dass Wasser von jeder Körperstelle (außer den „Bergen“ und „Tälern“) nach hinten gedrückt wird. Wäre Wasser fest, wäre die Geschwindigkeit der Welle gleich der Fortbewe-

gungsgeschwindigkeit des Fisches, er würde sich dann ähnlich einer Schraube in Holz vorwärtsbewegen, wobei seine Bewegung allerdings zweidimensional, die der Schraube dreidimensional ist. Real ist sie kleiner (ähnlich dem Froudeschen Wirkungsgrad bei Schiffsschrauben). Diese energiesparende Fortbewegungsart wird von Fischen hauptsächlich für länger dauernde Fortbewegung verwendet.

In der Simulation wird die folgende Veranschaulichung angeboten:

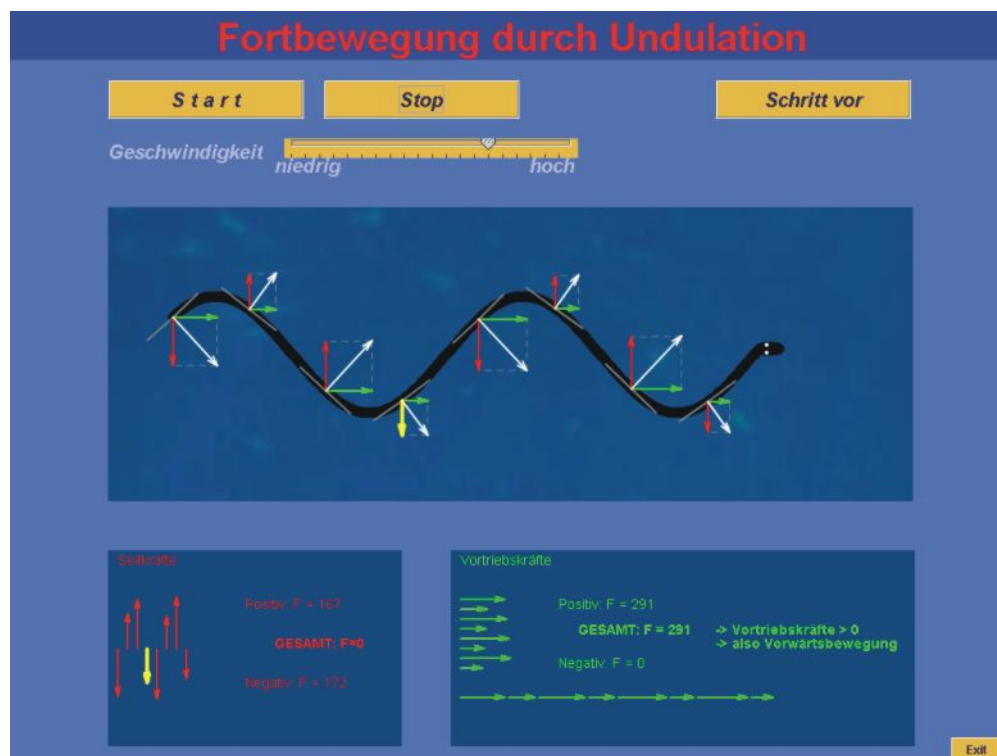


Abb. 8: Kräfte bei der Undulationsbewegung

## 2.5 Komplikationen

Zu diskutieren ist noch, inwiefern die gemachten Vereinfachungen die Wirklichkeit verfälschen. Der erste Faktor ist die Vernachlässigung des dynamischen Auftriebs (siehe oben). Das ist allerdings kein Problem: obwohl es ihn auch bei Meerestieren durchaus gibt, spielt er in der Kräfte- und Energiebilanz keine große Rolle. Problematischer ist, dass man die Rückwirkung der Bewegung auf die Wasserströmung vernachlässigt hat. Es wurde stets angenommen, dass alle Flossenschläge in statischem Wasser stattfinden, wie es in Wahrheit nur beim ersten Schlag vorliegt. Im Gegensatz zur erwähnten naiven Vorstellung eines geworfenen Körpers muss das bewegte Wasser ja bereits vorhandenes Wasser verdrängen, was zu einer großräumigen, länger anhaltenden Strömung führt, die zu einem Großteil aus Wirbeln besteht.

## 3. Unterrichtsablauf und Erfahrungen aus dem Unterricht

Das vorgestellte Thema wurde in einer neunten Klasse eines Frankfurter Gymnasiums im Anschluss an die Mechanik unterrichtet. Die Behandlung des Themas umfasste insgesamt 8 Stunden. Im folgenden ist die Stundenplanung bzw. der Stundenverlauf wiedergegeben.. Die mehrfach angesprochenen Simulationen lagen zu diesem Zeitpunkt leider noch nicht vor.

### Schritt 1. Wiederholung des Rückstoßprinzips

Zur Evaluation des Unterrichts wurde zunächst ein Fragebogen zum Interesse am Physikunterricht und an Physik ausgefüllt. Dann wurde an Voraussetzungen für Bewegung erinnert



(darüber war bereits bei der Behandlung der Mechanik im allgemeinen gesprochen worden): man kann sich nicht selbst bewegen, sondern nur durch Abdrücken von einem anderen Gegenstand in Bewegung setzen. Diese im ersten Moment überraschende Aussage wurde anhand der bekannten Münchhausenerzählung (er zieht sich selbst samt Pferd am Schopf aus dem Sumpf) erläutert sowie durch Versuche mit einem Skateboard, bei dem es im Gegensatz zum Gehen schwer ist, sich in Bewegung zu setzen.

Dies wurde an einigen Beispielen vertiefend besprochen, u.a.: Unmöglichkeit der Bewegung auf ideal glattem Eis (man könnte sich nicht einmal aufsetzen, sondern läge flach auf dem Eis).

### *Schritt 2. Arten der Schwimmbewegung*

Arten der Schwimmbewegungen wurden in Gruppenarbeit gesammelt und vorgetragen, wobei es um eine möglichst sorgfältige Beschreibung sowohl der menschlichen Schwimmbewegungen bei den verschiedenen Schwimmstilen sowie Bewegungsformen bei Wassertieren ging.

Da davon auszugehen ist, dass die Schüler nicht alle wesentlichen Klassen von Bewegungsformen finden, war vorgesehen, dass die Lehrkraft die nicht vorgestellten Bewegungsformen ergänzt. Diese Vorgehensweise erwies sich als problematisch. Die Schüler versuchten sich der Mühe der Beschreibung zu entziehen, indem sie sofort physikalische Erklärungen anboten, die in ihrer Allgemeinheit oft unbrauchbar waren. Offenbar fällt ihnen das unvoreingenommene Beobachten als eine Tätigkeit, die Geduld erfordert, schwer.

### *Schritt 3. Praktische Erfahrungen mit dem Rückstoßprinzip*

Zur Erklärung des Vortriebs wurde anknüpfend an Schritt 1 der Unterschied zwischen dem Abdrücken von einer Wand oder einer festen Unterlage und von einem nachgebenden Gegenstand behandelt. Unmittelbar einleuchtend war, dass man beim Abdrücken von einem Startblock, der nicht befestigt wurde, hinstürzt, statt vom Fleck zu kommen. Dennoch kann man sich auch von beweglichen Gegenständen abstoßen, wie außer durch weitere Versuche mit Skateboards auch durch Versuche mit Drehstühlen, fahrbaren Wagen und (in der Turnhalle) mit Pritschenwagen demonstriert wurde. Die Schüler fanden dabei ohne Lehrerimpuls, dass man sich umso besser fortbewegen kann, je schwerer der Gegenstand ist, von dem man sich abdrückt.

Die Ergebnisse wurden auf Flüssigkeiten und Gase übertragen. Auch von ihnen kann man sich abdrücken. Als Beispiel für Gase wurde die Kraft auf eine Hand, die aus einem fahrenden Auto gestreckt wird, angeführt. Dort versucht man die Luft, die vor einem liegt, beiseite zu drücken, wobei man die Hand nicht selbst nach vorne führt, sondern die Bewegung des Autos ausnutzt. Für den Fall von Flüssigkeiten zogen die Schüler ihre Hände durch ein kleines Wasserbecken, wie es für Aquarien benutzt wird, wobei sie bereits die Unterschiede in der erfahrenen Kraft bei verschiedenen Handstellungen und Bewegungsformen untersuchten, ohne dass das bereits in dieser Stunde vertieft wurde, abgesehen von der Erkenntnis, dass die Kraft mit der Bewegungsgeschwindigkeit zunimmt. Zusammenfassend wurde festgehalten, dass man sich auch von Gasen und Flüssigkeiten abdrücken kann, obwohl sie nicht unbeweglich sind in Analogie zu den beweglichen Gegenständen der vorausgegangenen Stunde.

### *Schritt 4: Die Schwimmbewegung der Qualle*

Als einfachster Fall der Fortbewegung unter Wasser wurde der Ausstoß von Wasser wie bei einer Qualle betrachtet. Dazu wurde ein Ballon prall mit gefärbtem Wasser (durch eine Tintenpatrone) gefüllt und dann in einem Wasserbecken losgelassen. Der Effekt wurde sodann mit der im zurückliegenden Mechanikunterricht erarbeiteten Rückstoß-Formel  $F \Delta t = m \Delta v$  analysiert. Die Schüler wurden mit dem Paradoxon konfrontiert, dass die Qualle eigentlich beim Einsaugen des Wassers den Vortrieb wieder aufheben müsste. Zur Auflösung benötigten

sie allerdings einen helfenden Hinweis, der in der Aufforderung bestand, sich den Bewegungsvorgang bei einer Qualle noch einmal deutlich vor Augen zu führen.

#### *Schritt 5: Beobachtung von Bewegungen von Fischen am Aquarium*

In dieser Stunde beobachteten die Schüler am schuleigenen Aquarium die verschiedenen Bewegungsformen der Fische. Sie kamen dabei ohne Hilfe auf die Klassifizierung Rudern, Oszillation und Undulation (natürlich unter anderer Namensgebung).

#### *Schritt 6: Die Ruderbewegung*

Als nächstes wurde die Ruderbewegung analysiert. Einige Schüler kamen dabei rasch darauf, dass das Ruder bzw. die Flosse bei der Rückführung verkantet werden muss und führten das mit Handbewegungen im Wasserbecken, bei denen man den Unterschied in den Kräften auch spürt, vor.

#### *Schritt 7: Die Oszillation*

Es folgte die Untersuchung der Bewegungsform der Oszillation, wieder mit entsprechenden Handbewegungen im Wasserbecken. Die Schüler wurden mit dem Problem konfrontiert, dass wiederum bei der Rückwärtsbewegung der Vortrieb zunichte gemacht wird (eine oszillierende Flosse kann nicht wie ein Ruder um ihren Befestigungspunkt gedreht werden). Durch Analogie zu einer Taucherflosse kamen die Schüler zu dem Modell einer Flosse, die in einer Richtung starr ist und sich bei Bewegung in Gegenrichtung unter dem Wasserdruck einrollt, ein Modell, das sich als besser erweist als das ursprünglich vorgesehene einer Flosse mit zwei, durch ein Scharnier verbundenen, starren Teilen.

#### *Schritt 8: Die Undulation*

Zum Abschluss wurde die Analyse der Schlängelbewegung durchgeführt. Wie zu erwarten, bereitete diese Bewegungsform die größten Schwierigkeiten und erforderte damit erhebliche Unterstützung seitens der Lehrkraft. Verglichen wurde die Bewegung einer Schraube in Holz (Abdrücken an einem festen Gegenstand) mit der Schlängelbewegung in Wasser, bei der man zwar weniger nach vorn kommt als man bei starrer Schraubung erwarten würde, aber in der gleichen Weise Kräfte auf die umgebende Substanz ausübt. Nach kurzer Erwähnung möglicher Komplikationen bei den gebotenen Erklärungen kamen die Schüler von selbst auf die Idee, dass Wirbel entstehen könnten und schlugen einen Versuch im Wasserbecken vor, der dann auch durchgeführt wurde (die Wirbelbewegung wurde durch Zufügung von Sägespänen sichtbar gemacht).

In der darauf folgenden Unterrichtsstunde wurde nochmals eine Befragung zum Interesse durchgeführt.

### **4. Zusammenfassung der Unterrichtserfahrung**

Das hervorstechendste Ergebnis ist, dass die Schüler den Gestaltungsraum erkannten und auch aktiv nutzten. Als positive Erfahrungen gaben sie an, dass es zu Diskussionen innerhalb der Klasse kam, dass es keine vorgegebenen oder leicht nachschlagbare Lösungen gab, so dass man eigene Vorschläge entwickeln konnte, usw. Die eigene Gestaltung ging so weit, dass sie eigene Experimente entwarfen und durchführten, um ihre Vorschläge zu überprüfen, so dass die Lehrkraft teilweise nur noch die Rolle eines Assistenten spielte. Selten findet man im Physikunterricht eine derartige Schülerautonomie. Allerdings wurde gelegentlich angekreidet, dass es durch den Wildwuchs an Vorschlägen und Möglichkeiten zu unübersichtlich und dadurch langweilig wurde. Weiterhin bestätigte die Erprobung die oben erwähnten geschlechtsspezifischen Unterschiede. In dieser Klasse bilden Mädchen und Jungen (schon in der Sitzordnung) zwei deutliche Blöcke, wobei die Mädchen sich im Unterricht vor der Er-

probung von den Jungen dominiert fühlten. Das war bei diesem Thema ganz anders. Es zeigte sich zudem, dass die Mädchen die weitaus besseren Beobachter waren (es wurden als Teil des Unterrichts Beobachtungen am schuleigenen Aquarium gemacht), während die Jungen voreilig Theorien entwerfen wollten. Sie klagten denn auch bei diesem Thema über einen Mangel an „handfester“ Physik und Formeln.

### **Literatur**

- [1] Plinninger, B.: Vortriebserzeugung wasserlebender Tiere – physikalische Erklärungsmodelle, Zulassungsarbeit für das Lehramt an Gymnasien, Universität München, 2002
- [2] Rachel, A.: Simulationsprogramme zur Veranschaulichung des Vortriebs wasserlebender Tiere. Zulassungsarbeit für das Lehramt an Gymnasien, Universität München, 2004