

Magnethydrodynamischer Antrieb Ladungen, Felder und ein „Düsentriebwerk für Wasser“

Ulrich Eichmann*

*Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt, eichmann@em.uni-frankfurt.de

Kurzfassung

Magnethydrodynamische (MHD) Antriebe von Schiffen und Unterseebooten sind ein interessanter Kontext, der motivierende Möglichkeiten für eine vertiefende, vernetzende Reflexion des Verhaltens von Ladungen in elektrischen und magnetischen Feldern bietet.

Ich stelle eine Bastelaufgabe vor, in der die Schülerinnen und Schüler dazu angehalten sind, relevante Zusammenhänge einzuüben und ihr Verständnis letztlich im Bau eines funktions-tüchtigen Schiffs mit MHD-Antrieb anzuwenden.

1. Einstieg – „Jagd auf Roter Oktober“

Den Schülerinnen und Schülern wird ein kurzer Auszug aus dem Film „Jagd auf Roter Oktober“ gezeigt. Sie sehen, wie der CIA-Agent Jack Ryan einem befreundeten Experten Skip Tyler Fotos eines neuen russischen U-Bootes, die „Rote Oktober“, vorlegt, das kurz zuvor seine Jungfernfahrt angetreten hat. Tyler bemerkt sofort die ungewöhnlichen Luken am Schiffskörper, „genau entlang der Längsachse“. „Das ... das könnte eine Raupe sein“ vermutet Tyler, „ein Raupenantrieb, ein magnethydrodynamisches Antriebssystem – kannst Du folgen?“.

Mit dieser Frage, weitergegeben an die Schülerinnen und Schüler, endet der Filmausschnitt.

2. Wie wird das Boot angetrieben?

Tyler verrät nichts Konkretes darüber, wie der Antrieb arbeitet – außer den im Film gezeigten Fotos und der Bezeichnung des Antriebs (magnet hydro dynamisch) ist den Schülerinnen und Schülern nichts bekannt. Die Aufgabe ist also zunächst, mit diesen Informationen rückwärts das Funktionsprinzip Schritt für Schritt herzuleiten.

Die Schülerinnen und Schüler können vermuten, dass aus den Luken Wasser ausgestoßen wird, das nach dem Rückstoßprinzip das Boot antreibt. Zur Bestätigung – alternativ als Hilfestellung, sollten die Schülerinnen und Schüler hier Schwierigkeiten haben – wird die nachfolgende Szene des Films gezeigt. In dieser erklärt Tyler, dass der Antrieb wie ein „Düsentriebwerk für Wasser“ sei.

Für den Ausstoß des Wassers ist der Einfluss eines Magneten, bzw. eines Magnetfeldes maßgeblich.

Könnte nun dieses russische U-Boot fast geräuschlos zu den Vereinigten Staaten fahren und dort möglicherweise ebenso unbemerkt über Flussläufe ins Landesinnere gelangen? Fährt dieses Schiff auch in Süßwasser?

Ein Magnet beeinflusst Süßwasser kaum, er übt hingegen auf andere Magnete oder auf bewegte Ladungen eine Kraft aus. Bewegliche Ladungen gibt es in Meerwasser zur Genüge – positive und negative. Damit diese eine Lorentzkraft spüren, müssen sie in Bewegung sein.

Die Schülerinnen und Schüler können überlegen, dass die Ausstoßrichtung des Wassers der Richtung der Lorentzkraft entspricht, die damit eine ursprüngliche Bewegungsrichtung der Ladungen relativ zur Richtung eines Magnetfeldes vorgibt. Eine zusätzliche elektrische Kraft, d.h., ein elektrisches Feld, durch das die Ladungen in diese ursprüngliche Richtung in Bewegung versetzt werden, wird nun recht rasch von den Schülerinnen und Schülern gefordert.

Die Orientierung der Felder, so erkennen die Schülerinnen und Schüler teils mit Erstaunen, ist von der Polung der Ladungen unabhängig – die Bewegungen beider Ladungsarten werden durch einen Strom beschrieben.

Diese Überlegungen können für manche Schülerinnen und Schüler zunächst schwierig sein, geht es doch um den Ausstoß des Meerwassers, dessen überwiegender Anteil elektrisch neutral ist. Wie erzeugt der kleine Anteil geladener Teilchen diesen enormen Schub?

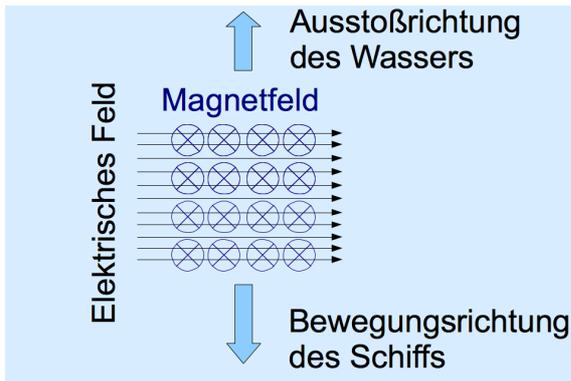


Abb.1: Anordnung der Felder und der sich daraus ergebende Antrieb des Schiffs.

Die Schülerinnen und Schüler können die Erklärung erarbeiten, dass das Wasser durch Impulsübertrag in Stößen mit den Ionen in Bewegung versetzt wird und dann ungehindert das elektrische und das magnetische Feld durchläuft.

3. Der Bau des Antriebs im Unterricht

Vorüberlegungen

Die naheliegende Planung und Konstruktion des Antriebs in Form einer Röhre, deren Längsseiten durch die magnetischen und elektrischen Pole gebildet werden, erschien mir mit der Vorgabe, dass ein robuster MHD-Motor einfach und in möglichst kurzer Zeit zu verwirklichen sei, für den Unterricht als zu schwierig.

Hinzu kommt die Forderung, dass das fertige Schiffchen sowohl ein geringes Gewicht als auch einen geringen Strömungswiderstand haben sollte, da der Antrieb recht schwach ist, wie sich in der Vorbereitung zeigte.

Wo und wie kann die Konstruktion vereinfacht und damit Material und Gewicht eingespart werden?

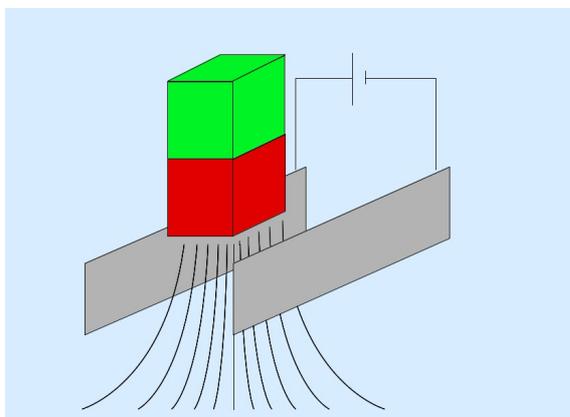


Abb. 2: Mögliches Konstruktionsprinzip des MHD-Antriebs. Die Zeichnung entspricht dem Tafelbild.

Die Elektroden, die letztlich das elektrische Feld erzeugen, lassen sich auf recht einfache Weise mit

sehr geringem Gewicht bauen. Anders die Magnetpole. Mit den Schülerinnen und Schülern wird erarbeitet, dass das Magnetfeld lediglich innerhalb des elektrischen Feldes möglichst homogen sein muss, idealerweise innerhalb des gesamten elektrischen Feldes.

Damit stehen die minimalen Anforderungen an den MHD-Antrieb fest: Permanentmagnet(e) mit ausgewiesener Polung („Kühlschrankschrankmagnete“ sind beispielsweise wegen ihrer komplizierten Magnetisierung nicht geeignet), zwei Elektroden und eine Gleichspannungsquelle.

Die Baumaterialien und der Bau des Schiffs

Jeweils vier Schülerinnen und Schüler erhalten als Baumaterialien für den Antrieb zwei Teelichtdosen für die Elektroden (im Unterricht sind diese noch nicht aufgeschnitten), zwei 9V-Blöcke (in Reihe geschaltet), Anschlusskabel und vier Magnete mit markierten Südpolen. Außerdem ein Spielzeugschiffchen, dessen Aufbau entfernt wurde. Zusätzlich stehen allen Schülerinnen und Schülern Heißklebepistolen zur Verfügung.

Der Arbeitsauftrag für die Bastelphase lautet, den Antrieb so zu konstruieren, dass das Schiff vorwärts fährt.

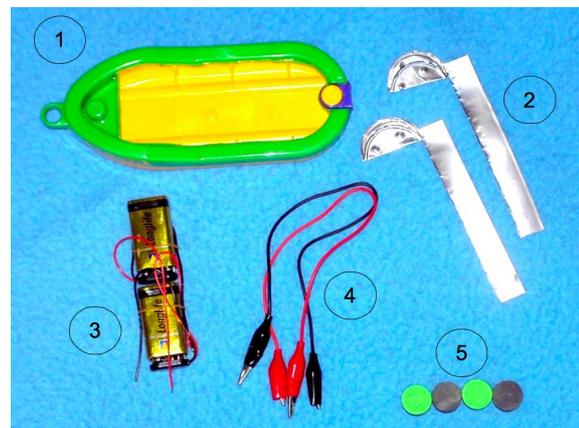


Abb. 3: Die Baumaterialien: 1 Spielzeugschiffchen, 2 aufgeschnittene Teelichtdosen, 3 Batterien mit Anschlüssen (2 x 9V-Block in Reihe), 4 Verbindungskabel, 5 Magnete (Südpol markiert)

Der Bau des Antriebs gelingt den Schülerinnen und Schülern mit den zuvor angestellten Überlegungen sehr gut. Die Teelichtdosen werden aufgeschnitten und unter dem Schiff als Elektroden angebracht. Die Unterseiten der Dosen werden gelegentlich vollständig abgeschnitten, was lediglich den Anschluss der Kabel geringfügig erschwert und möglicherweise zu einem erhöhten Widerstand des Bootes führt.

Die Magnete werden von manchen Gruppen zunächst versucht, unter das Boot zwischen die Elektroden zu kleben, die Idee wird jedoch rasch ver-

worfen: Die Magnete haften an den Batterien und werden mit diesen in das Boot gelegt.

Ein große Vereinfachung ist durch das verwendete Bootsmodell gegeben: Die Schiffsrümpfe weisen zwei Rillen auf, die sich über die gesamte Schiffslänge erstrecken. Außen laden sie dazu ein, die Elektroden im richtigen Abstand (der Abstand der Rillen entspricht in etwa dem Durchmesser der Magnete) parallel zur späteren Bewegungsrichtung anzubringen, im Inneren helfen sie, Batterien und Magnete mittig zu platzieren – so sitzen die Magnete genau zwischen den Elektroden und das Schiff ist darüber hinaus gut austariert.

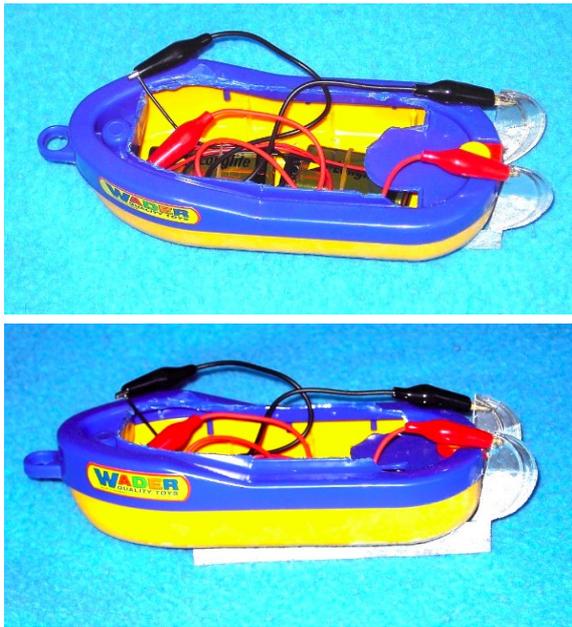


Abb. 4: Eine mögliche Lösung

4. Praxistest

In vorbereiteten Wannen mit gesättigter Kochsalzlösung treten die Schiffchen ihre Jungfernfahrt an. Der selbstgebaute Antrieb funktioniert – die Schiffe erreichen Geschwindigkeiten von bis zu einem Zentimeter pro Sekunde (siehe beigefügter Film).

Den Abschluss des Unterrichts soll ein Rückbezug zum Film „Jagd auf Roter Oktober“, genauer: zur zweiten Filmszene, bilden. Hier führt Tyler weiter aus, dass der Antrieb „sehr sehr leise“ sei. Diese angebliche Besonderheit des MHD-Antriebs ist nach meinen Erfahrungen einigen Schülerinnen und Schülern (durch den Film) durchaus bekannt.

Ist dieser Antrieb tatsächlich lautlos?

Bei der Fahrt der Schiffe kann man zusätzlich die in Gang gesetzte Elektrolyse beobachten, die Gasentwicklung an den Elektroden kann von den Schülerinnen und Schülern gut gesehen und vor allem gehört werden. Die Lautlosigkeit des Antriebs ist ein Märchen.



Abb. 5: Gasentwicklung an den Elektroden

Anders die Antriebsart selbst. Diese wird tatsächlich in Schiffen erprobt, was man zum Stundenende den Schülerinnen und Schülern beispielsweise mit Fotografien der japanischen Schiffe Yamato I und Yamato II demonstriert [1][2].

Die starke Korrosion der Elektroden als Begleiterscheinung der Elektrolyse wird als Problem für die Realisierung dieses Antriebs erkannt.

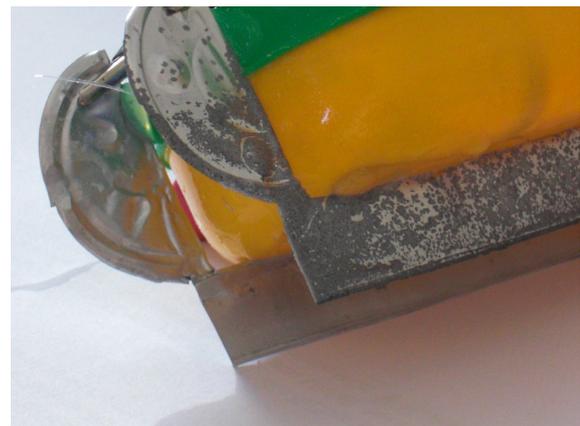


Abb. 6: Korrosion der Elektroden

5. Weiterführende Fragen

Die erfolgreiche Erprobung des Antriebs war indes auch enttäuschend: „Roter Oktober“ fuhr im Film über 1300 mal so schnell, Yamato I erreichte die 300fache Geschwindigkeit – und das in Meerwasser mit viel geringerem Salzgehalt.

Wie lässt sich die Geschwindigkeit des Bootes vergrößern?

Ausgangspunkt für die Überlegungen ist die Formel für die Lorentzkraft (eine mathematisch Präzise, vektorielle Betrachtung ist im Rahmen dieser qualitativen Behandlung nicht nötig)

$$F = B I l \quad \text{oder} \quad F = q v B$$

Eine größere Stromstärke (eine größere Ionengeschwindigkeit) lässt sich beispielsweise durch ein stärkeres elektrisches Feld, d.h., eine größere Span-

nung, erzeugen. Ebenfalls lässt sich die Stromstärke erhöhen, indem man die Anzahl der bewegten Ladungen vergrößert. Dies kann man durch eine Vergrößerung der Elektroden erreichen.

Wie 'groß' die Stromstärke im bisherigen Antrieb ist, habe ich mit den Schülerinnen und Schülern über die (für die meisten Schülerinnen und Schüler) überraschend kurze Lebensdauer der Batterien abgeschätzt. Die Batterien hielten in der Folgestunde kaum noch für weitere Versuche.

Erhöht sich auch die Lorentzkraft, wenn man den Abstand der Elektroden l vergrößert? Hierbei muss betrachtet werden, wie die elektrische Feldstärke vom Plattenabstand abhängt. Auch können mögliche Abschirmungseffekte beleuchtet werden.

Zuletzt müssen die Schülerinnen und Schüler überlegen, ob die Geometrie des (inhomogenen) magnetischen Feldes eine Veränderung von Elektrodenabstand und -größe zulässt.

Die Lorentzkraft kann auch durch den Einsatz stärkerer Magnete (die Anzahl richtet sich nach der Länge der Elektroden) gesteigert werden, ebenso durch eine veränderte Konstruktion, in der ein homogenes Magnetfeld erreicht wird.

Als Anhaltspunkt wollen die Schülerinnen und Schüler erfahren, wie groß die erforderlichen Strom- und Feldstärken in MHD-getriebenen Schiffen tatsächlich sind.

Die Feldstärke, die in Yamato I für den Antrieb sorgt, ist bereits sehr groß (4T) (siehe z.B. [3]). Die für den Antrieb der „Roten Oktober“ erforderlichen, exorbitanten Strom- und Feldstärken werden in [4] abgeschätzt (5000A und 435T oder 540000A und 4T), die einzelnen physikalischen Größen in einem MHD-Antrieb werden hier sorgfältig untersucht.

Diese Werte stellen enorme technische Schwierigkeiten dar.

Zusammen mit der Frage nach einer Erhöhung der Geschwindigkeit stellt sich auch die Frage nach einer Höchstgeschwindigkeit.

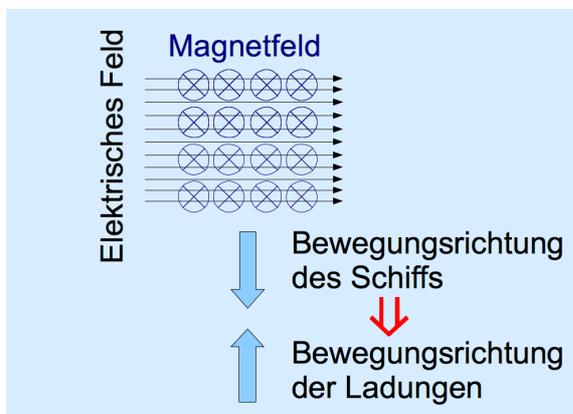


Abb. 7: Überlegungen zu einer möglichen Höchstgeschwindigkeit

Hier müssen die Schülerinnen und Schüler die Ionen betrachten, die mit der Geschwindigkeit des Bootes in die Antriebseinheit eintreten, wo sie ein elektrisches und ein magnetisches Feld spüren. Die Wirkungen der Felder konkurrieren miteinander.

Diese Überlegungen führen die Schülerinnen und Schüler letztlich zum Verständnis des Geschwindigkeitsfilters.

6. Allgemeine Betrachtungen

Das vorgestellte MHD-getriebene Schiffchen habe ich bereits in mehreren Physik-Grundkursen erfolgreich in einer Unterrichtsstunde (45 Minuten) bauen lassen. Die Unterrichtsidee wurde von Frau Zwiorek bereits in [5] vorgestellt.

Der Unterricht war vorrangig von der qualitativen Beschreibung von Phänomenen aus dem Bereich der Wechselwirkung von Ladungen mit elektrischen und magnetischen Feldern geprägt. Die Schülerinnen und Schüler wurden immer wieder dazu angehalten, komplexe Zusammenhänge zu kommunizieren, allgemein, physikalische Sachverhalte zu versprachlichen, um sich so im Argumentieren und Begründen zu üben.

Der magnethydrodynamische Antrieb stellt einen Kontext dar, der vielfältige Möglichkeiten bietet, das neu erarbeitete Fachwissen mit anderen Gebieten der Physik und auch der Chemie zu vernetzen. Darüber hinaus kann mit ihm die Entwicklung der oben erwähnten Kompetenzen sehr gut vorangetrieben werden.

Das U-Boot „Roter Oktober“ ist das prominenteste Beispiel für den MHD-Antrieb, nach meiner Erfahrung ist der Film bei den Schülerinnen und Schülern recht bekannt. Dieses besondere Schiff und die zugehörige Geschichte war bislang für alle Schülerinnen und Schüler ein ansprechender Zugang zu physikalischen Fragen im Bereich der Wechselwirkungen von Ladungen mit elektrischen und magnetischen Feldern. Zudem ist die „physikalische Hürde“ sehr niedrig – als spezielles Vorwissen benötigen die Schülerinnen und Schüler lediglich Grundkenntnisse über die Lorentzkraft.

Ein Ziel in diesem Unterricht war, die Schülerinnen und Schüler möglichst rasch selbstständig ein funktionstüchtiges MHD-getriebenes Schiff bauen zu lassen, das zur Veranschaulichung dient und als reales Modell für weiteren Überlegungen zur Verfügung steht. Die Motivation beispielsweise für eine Optimierung des Antriebs ist größer als für einen langwierigen Entwicklungsprozess.

Bei der Weiterentwicklung wurde mit den Schülerinnen und Schülern das „Lesen“ von Gleichungen (als Kodierung physikalischer Zusammenhänge) geübt.

Die technische Umsetzung der entwickelten Ideen erfordert aktives Wissen über Beziehungen; und in der geistigen Erprobung am Modell sind die Schülerinnen und Schüler gezwungen, zahlreiche mögliche Konsequenzen zu beleuchten und vernetzen so ihre Kenntnisse.

Beigefügter Film:
MHD-Boot-Fahrt_.avi

7. Literatur

- [1] <http://www.skewsme.com/mhd.html> (27.05.11)
- [2] http://en.wikipedia.org/wiki/Yamato_1 (27.05.11)
- [3] Tixador, P: Magnetic levitation and MHD propulsion. In: J. Phys. III France, 4 (1994) 581-593
- [4] Font, G.I.; Dudley, S.C.: Magneto-hydrodynamic Propulsion for the Classroom. In: The Physics Teacher, 42 (2004) 410-415
- [5] Zwiorek, Sigrid: Schülerexperimente im Unterricht. In: Physik Didaktik (Hrsg. H.F. Mikelskis), Cornelsen Verlag Scriptor GmbH & Co KG, Berlin (2006)