

Einführung in die Hydromechanik im fachübergreifenden Kontext

Jan-Peter Meyn

Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg
Physikalisches Institut, Abteilung für Didaktik der Physik
Staudtstraße 7, 91058 Erlangen, jan-peter.meyn@physik.uni-erlangen.de
(Eingegangen: 17.05.2005; Angenommen: 10.02.2006)

Kurzfassung

Das fachübergreifende Thema Herz-Kreislauf-System des Menschen wird in einen einführenden Lehrgang zur Hydrodynamik in der Sekundarstufe I integriert. In Anlehnung an den Karlsruher Physikkurs wird der Druckunterschied als Antrieb einer Strömung betrachtet; dadurch wird die Trennung der Begriffe Kraft und Druck erleichtert. Ein neues Experimentiermodell kann von Schülern bedient werden und dient auch zur bewussten Diskussion des Modellbildungsprozesses. Das erworbene physikalische Wissen wird zur Erklärung medizinischer Aspekte wie Herzinfarkt und Bluthochdruck verwendet.

1. Einleitung

Die Förderung des Interesses und des Lernerfolges von Schülern durch fachübergreifende Themen ist nachgewiesen. Themen mit medizinischem Bezug sind besonders geeignet, weil sie einen starken Bezug zur Lebenswelt der Schüler haben und weil eine Vielzahl von verschiedenen physikalischen Fachgebieten berührt werden [1]. Medizinische Themen unterstützen die Förderung der Mädchen im Physikunterricht [2]. Eine aktuelle Übersicht über die wesentlichen Aspekte fächerverbindenden Unterrichts findet man auch in [3]. Die praktische Umsetzung fachübergreifender Themen wird von vielen Lehrkräften als schwierig eingeschätzt, da der gegebene Zeitrahmen ohnehin als zu knapp empfunden wird. Ein Unterrichtsvorschlag für das Thema Kreislauf [4] im Umfang von 14 Stunden bestätigt den hohen zeitlichen Aufwand.

Aus fachwissenschaftlicher Sicht soll Physikunterricht mit den Zielen und Methoden der Physik auf propädeutischer Basis vertraut machen. Der Karlsruher Physikkurs [5,6] ist ein bewährter und nachgewiesen erfolgreicher Ansatz [7], das Curriculum zu strukturieren und zu entfrachten. Der Münchner Physikkurs [8] hat ebenfalls das Ziel, den Physikunterricht wirkungsvoller und effizienter zu machen. Fachwissenschaftliche Struktur und fachübergreifende Themen sind Schwerpunkte, die sich nicht ohne weiteres gleichzeitig verfolgen lassen. Unterrichtsvorschläge zu fachübergreifenden Themen berühren oft nicht die Probleme der Bildung physikalischer Begriffe und Modelle. In vielen Schulbüchern findet man Themen wie Blutdruck, Kreislauf, etc. als Einschub oder Anhang. Für den Physikunterricht besteht die Gefahr, dass die fachspezifischen Methoden in den Hintergrund treten und der Transfer physikalischen Wissens auf neue Probleme erschwert wird, besonders wenn die Physik über einen

größeren Teil der Schullaufbahn im Rahmen eines allgemeinen Fachs Naturwissenschaft unterrichtet wird. Für die erwünschte Synthese von physikalischen Inhalten in sinnstiftenden Kontexten mit Lebensbezug wurde der Begriff *fachübergreifender Fachunterricht* geprägt [9].

Das Ziel dieser Arbeit ist die Integration eines fachübergreifenden Themas in eine nach fachdidaktischen Gesichtspunkten strukturierte Unterrichtsreihe, so dass die Lernziele im Fach Physik zeitlich effizient erreicht und gleichzeitig die Vorteile des fachübergreifenden Beispiels genutzt werden können.

2. Druck und Strömungen

Schwierigkeiten bei der Einführung der physikalischen Größe *Druck* sind im Detail analysiert worden [10,11]. Ein zentraler Aspekt ist die präzise begriffliche Unterscheidung des Drucks als skalare (Zustands-)größe von der Kraft als vektorielle Größe. Mit der üblichen Definition *Druck ist Kraft pro Fläche* werden beide Begriffe eng miteinander verknüpft; in der einfachen Formel $p=F/A$ unterscheiden sie sich nur durch einen konstanten Faktor.

Die Alltagsvorstellungen von jüngeren Schülerinnen und Schülern tendieren durchaus zum Druck als Zustandsgröße. Die resultierende Forderung, den Druck als *Zustand des Gepresstseins* einzuführen [12], ist inzwischen in Schulbüchern wie z.B. [13] umgesetzt. Oft folgt unmittelbar nach der Einführung des Begriffes ein Experiment oder Beispiel, in dem doch wieder mit Kraft argumentiert wird. Folgender Satz aus [13] illustriert, dass eine elegante Formulierung noch nicht gefunden wurde: *Druck kennzeichnet den Zustand einer Flüssigkeit, der sich durch Kräfte senkrecht zu den Begrenzungsflächen der Flüssigkeit bemerkbar macht.*

Der Zustand des Gepresstseins als Synonym für Druck sollte meiner Ansicht nach nicht am Beispiel von Gasen eingeführt werden, weil die Volumenabnahme bei Erhöhung des Drucks und die Zunahme der potentiellen Energie als zwangsläufige Begleiterscheinungen aufgefasst werden könnten. Im Falle von inkompressiblen Medien unter Druck sind Kontraktion sowie potentielle Energie sehr klein. Ein bekanntes Beispiel ist das Sprengen einer Eisenkugel mit gefrierendem Wasser.

Wenn man alle genannten Punkte gleichzeitig berücksichtigen will, bleibt nicht viel mehr, als einen wassergefüllten Behälter mit Manometer zu zeigen: Das wäre die Essenz der Hydrostatik. Ein möglicher Ausweg aus diesem Dilemma ist die Einführung des Drucks über eine dynamische Situation, also durch Strömungen.

Im Karlsruher Physikkurs gehören Strömungen zum gedanklichen Fundament des gesamten Lehrwerks. Ausgehend von Wasserströmungen werden später Impulsströme, Entropieströme, Ladungsströme, etc. behandelt. Diese Ströme sind Energieträger; es gibt nur *die* Energie, aber verschiedenartige Energieströme anstelle der konventionellen Energiearten. Im Karlsruher Physikkurs wird einführend festgestellt, dass der Druck eine physikalische Größe ist, die man mit einem Manometer messen kann; der wesentliche Teil des Kapitels zum Druck betrifft den Druckunterschied als Antrieb einer Strömung. Es mag zunächst umständlich erscheinen, eine physikalische Größe über ihren räumlichen Unterschied zu erklären, aber von der elektrischen Spannung als Potentialdifferenz ist uns diese Sicht vertraut.

Der vorliegende Ansatz folgt dem Karlsruher Physikkurs bezüglich der Einführung in die Wasserströmung, ohne dass auf andere Aspekte des Karlsruher Physikkurs, wie z.B. Impulsströme, Bezug genommen wird; die Umsetzung in einer Unterrichtsreihe ist daher zum konventionellen Lehrplan kompatibel. Umgekehrt eignet sich die vorgestellte Arbeit als eine fachübergreifende Erweiterung zum Karlsruher Physikkurs. Ein wesentlicher Vorteil der Behandlung von Strömungen - welche an sich nicht von Lehrplänen verlangt wird - ist die Vorbereitung der Elektrizitätslehre in nachfolgenden Schuljahren. Die meisten Schulbücher und wahrscheinlich auch Lehrkräfte greifen zur Veranschaulichung auf Modelle von Wasserströmungen zurück. Dieses Vorgehensweise ist sehr bedenklich, wenn man das Thema zuvor nicht behandelt hat und impliziert, dass die Schülerinnen und Schülerkorrekte Alltagsvorstellungen von Strömungen mitbringen. Diese Annahme ist unrealistisch [14].

3. Modellbildung

Die Fähigkeit, adäquate Modelle zur Beschreibung eines komplexen Zusammenhangs zu bilden, ist ein zentrales, aber auch anspruchsvolles Bildungsziel der weiterführenden Schule und der Universität. Die Beschäftigung mit Physik bietet hierzu vielfältige

Möglichkeiten [15]. In der Praxis haben sich Modelle als eine wesentliche Schwierigkeit des Physikunterrichts erwiesen. Eine Ursache dafür ist die unzureichende Berücksichtigung der Schülervorstellungen (Präkonzepte). Schülerinnen und Schüler nehmen z.B. oft das Teilchen-Modell zur Kenntnis und argumentieren damit, ohne sich von ihren Präkonzepten gelöst zu haben. Charakteristisch sind Aussagen wie: „Ein Gas dehnt sich bei Erwärmung aus, weil sich die Teilchen ausdehnen.“ Durch bewusste Auswahl des Modells und Arbeit am Modellbildungsprozess können diese Probleme erheblich reduziert werden, vgl. z.B. [16].

Das Thema Herz bietet eine günstige Möglichkeit, Modellbildung in den Unterricht zu integrieren. Es ist klar, dass invasive Untersuchungen nicht am lebenden Objekt durchgeführt werden können; die Notwendigkeit eines Modells erscheint den Schülerinnen und Schülern zwangsläufig. Hier dient ein technisches Modell zur Erläuterung der Funktion des Herz-Kreislauf-Systems, um einzelne Aspekte praktisch zu demonstrieren. Dieses Modell ist einfacher zu verstehen als mentale Modelle zu Objekten, die der direkten Erfahrung prinzipiell unzugänglich sind, wie z.B. Teilchenmodelle. Ein wichtiger Schritt der Modellbildung ist die Entscheidung, ein bestimmtes Merkmal des Originals zu reproduzieren, während andere, unwesentliche Merkmale im Rahmen der bewussten Vereinfachung nicht wiedergegeben werden. Dieser Schritt wird im Herzmodell an vielen Stellen gegangen, z.B. bei der Darstellung des Bluts durch Wasser. Das ist eine Übung des Modellbildungsprozesses im o.g. Sinne.

4. Das Herzmodell

4.1. Konstruktionsmerkmale

Das Herz-Kreislauf-System des Menschen ist in Lehrbüchern der Biologie oder Medizin erläutert. Das Prinzip ist in Abbildung 1 gezeigt [17].

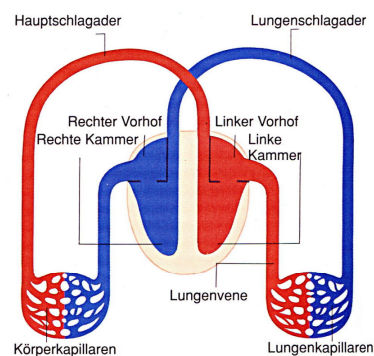


Abbildung 1: Aufbau des Herz-Kreislauf-Systems

Ein physikalisches Modell soll einfach aufgebaut sein und bezüglich der Funktion dem Herzen möglichst nahe kommen. Herzmodelle, die bisher für den Physikunterricht vorgeschlagen wurden, verwenden einen gerichteten Antrieb durch einen Kolben sowie technische Ventile [4,18]. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein neuer Aufbau entwickelt, der realitätsnä-

her ist, ohne komplexer zu sein. Das Modell besteht aus einer handbetriebenen Pumpkammer aus Fahrradschlauch und Ventilen sowie einem Latexschlauch als Ader, wie in Abbildung 2 gezeigt.



Abbildung 2: Pumpkammer mit Latexschlauch als Ader, der mit Steckverbindern angeschlossen ist.

Der Antrieb der Strömung erfolgt durch Kompression des Fahrradschlauchs per Hand, welche die Aufgabe des Herzmuskels übernimmt. Die Ventile der Pumpkammer sind als passive Segelklappen aus Gummi ausgeführt. Der Schaltwiderstand ist vernachlässigbar gering. Dadurch kann der Strömungswiderstand im Schlauch direkt mit der Hand wahrgenommen werden und das Öffnen und Schließen wird allein durch die Druckverhältnisse bestimmt. In Abbildung 3 ist ein demontiertes Ventil gezeigt.



Abbildung 3: Aufbau der Ventile. Unter dem geschlitzten Gummi befindet sich eine durchbohrte Platte, die in Abbildung 2 sichtbar ist. Der transparente Deckel mit Schlauchanschluss kann auf beiden Seiten angeschraubt werden, so dass der Mechanismus wahlweise als Einlass- oder Auslassventil verwendet werden kann.

Die Länge des Schlauchs wurde mit 5 Metern so gewählt, dass diese Modell-Ader um einen erwachsenen Menschen herumgelegt werden kann. Auf die doppelte Anlage von Körper- und Lungenkreislauf und die Andeutung eines Kapillarsystems wurde bewusst verzichtet. Der Durchmesser des Schlauchs wurde so gewählt, dass die Strömung laminar ist. Eine laminare Strömung erlaubt die Wahrnehmung von realistischen Pumpgeräuschen. Die Zunahme des Strömungswiderstandes bei Verengung des Schlauches entspricht genau den Verhältnissen im Körper. Zur Dimensionierung wurde angenommen, dass der maximale Druck im Modell von der

gleichen Größenordnung wie der menschliche Blutdruck (Differenz von mittlerem arteriellem und venösem Druck) sein soll, nämlich $p = 10\text{kPa}$. Dieser Druck wird durch kräftige manuelle Kompression der Pumpkammer tatsächlich erreicht. Die Reynoldszahl wird auf $Re = 1000$ begrenzt, um die Strömung laminar zu halten. Die Reynoldszahl ist bestimmt durch die Dichte $\rho = 1000\text{kgm}^{-3}$, die Viskosität des Wassers $\eta = 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$ und die mittlere Geschwindigkeit des Wassers \bar{v} gemäß

$$Re = \frac{r\rho\bar{v}}{\eta} \quad (1)$$

Mit $Re = 1000$ muss $\bar{v} = 0,64\text{ms}^{-1}$ sein. Das Hagen-Poiseuillesche Gesetz [19]

$$\dot{V} = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8\eta l} \quad (2)$$

gibt die Stromstärke, d.h. den Volumenstrom \dot{V} in einem Rohr vom Radius r mit einem Druckunterschied Δp über der Länge l an. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit ist $\bar{v} = l/\pi r^2$. Durch Einsetzen der gegebenen Werte erhält man für den Radius 1,6mm. Daher wurde ein Schlauch mit 3,2mm Innendurchmesser für die Modellader gewählt. Der Außendurchmesser von 4,8mm ist vergleichbar mit sichtbaren Blutgefäßen an den Gliedmaßen. Das Schlagvolumen ist mit 5ml erheblich geringer als beim Herzen (100ml). Diese Diskrepanz ist von untergeordneter Bedeutung und ließe sich nur durch eine aufwändige Vergrößerung des ganzen Modells beseitigen. Das Pumpmodul kann mit selbstschließenden Steckverbindern [20] an verschiedene wassergefüllte Schläuche angeschlossen werden. Die Durchführung aller Experimente durch Schülerinnen und Schüler ist möglich, wie im Abschnitt 6 ausgeführt wird. So kann der Unterricht durch handlungsorientierte Sozialformen bereichert werden.

5. Experimente mit dem Herzmodell

5.1 Antrieb einer Strömung

Die Mindestanforderung an ein Herzmodell ist die Demonstration des Antriebs einer Strömung. Hier erfolgt der Nachweis mit einem Durchflussmesser (Abb. 4).



Abbildung 4: Pumpmodul mit Durchflussmesser

5.2. Ursache des Doppelschlags

Eine denkbare Erklärung für doppelte akustische Struktur des Herzschlags könnte sein, dass das Herz zwei Pumpkammern hat. In diesem Modell kann der Doppelschlag mit einem Stethoskop gehört werden, und da die Pumpkammer einfach ist, wird dieser Erklärungsansatz ausgeschlossen. Die paarweise auftretenden Herzschläge entstehen jeweils beim Schließen der Venenklappe (Einlass) zu Beginn der Kontraktion der Herzkammer sowie beim Schließen der Aortenklappe (Auslass) am Ende der Kontraktionsphase, wenn der Druck in der Herzkammer unter den Druck in der Aorta sinkt. Die nachfolgende Entspannungsphase ist deutlich länger als die Kontraktionsphase, so dass ein Doppelschlag wahrgenommen wird. Im Modell zwingt schon die relativ langsame Befüllung der Pumpkammer zu einer realitätsgerechten Reproduktion. Die sichtbare Bewegung der weichen Gummiklappen untermauert die Feststellung, dass der Herzschlag durch die Geschwindigkeitsänderung der Strömung beim Schließen verursacht wird und nicht durch die Klappen selbst. Eine experimentelle Demonstration, dass schnell abgebremstes Wasser Schlaggeräusche macht, z.B. durch einen so genannten Wasserhammer [21] wäre kein Beweis, dass die gesunden Herzklappen *keine* Eigengeräusche verursachen; daher ist hier die Mitteilung der medizinischen Fakten geboten.

5.3. Strömungswiderstand

Der geringe Schaltwiderstand der Segelklappen erlaubt ein Experiment zum Strömungswiderstand in einem offenen Aufbau. Zwei identische Pumpmodule werden an einen gemeinsamen Wasservorrat angeschlossen. Dieser Vorratsbehälter wird ca. 50cm höher als die Pumpmodule aufgestellt, um eine rasche Füllung in der Ruhephase des Pumpvorgangs zu gewährleisten; der Schweredruck dient lediglich zur Überwindung des Strömungswiderstands in den Zuleitungen. Auf der Ausgangsseite der Pumpmodule befindet sich jeweils ein 5m langer Schlauch mit 2,4mm bzw. 3,2mm Innendurchmesser, die zu Auffangbehältern führen. Der Strömungswiderstand W fällt nach dem Gesetz von Hagen-Poiseuille (Gleichung 2) mit der vierten Potenz des Schlauchradius r :

$$W = \frac{\Delta p}{\dot{V}} = \frac{8\eta l}{\pi r^4} \quad (3)$$

Der Strömungswiderstand im dünneren Schlauch ist also rund dreimal so groß wie im dicken Schlauch. Demnach kann mit gegebenem Antriebsdruck und gleicher Pumpfrequenz dreimalweniger Wasser pro Zeiteinheit durch den dünneren Schlauch gepumpt werden. Ohne Kontrolle von Antriebsdruck und Pumpfrequenz kann zwar keine quantitative Messung durchgeführt werden, aber unter normalen Umständen dominiert der Einfluss des Strömungs-

widerstands. Durch Auswechseln gegen einen kürzeren Schlauch kann man noch die Längenabhängigkeit des Strömungswiderstandes zeigen.

5.4. Bedeutung der Druckdifferenz

Ein zentrales Experiment ist der Nachweis, dass eine Erhöhung des Drucks im Wasser noch keine Strömung antreibt, sondern dass eine Druckdifferenz notwendig ist. Da U-Rohr-Manometer ohne vorherige Behandlung des Schweredruckes nicht zur Verfügung stehen und die Verwendung von Zeigermanometern zu aufwändig erschien, wurde ein indirekter Nachweis gewählt. Dazu wird der elastische Latexschlauch gegen ein starres Kupferrohr mit gleichem Innendurchmesser ausgetauscht. Man spürt beim Pumpversuch, dass das Wasser inkompressibel ist, aber ein Fließen ist nicht zusehen. Die Erklärung erfolgt mit dem Schema in Abbildung 5.

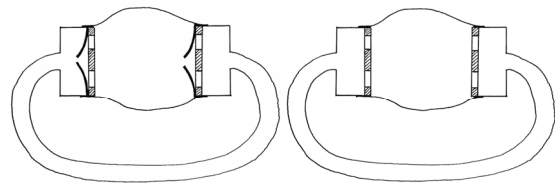


Abbildung 5: Schema zum Pumpmechanismus: Im linken Bild erscheint der Antrieb einer Strömung möglich. Durch Weglassen der Klappen wird die Symmetrie deutlich.

In indifferenter Stellung der weichen Ventile wird der Druck bei der Kompression des Schlauches im gesamten Flüssigkeitsvolumen gleichmäßig größer. Wenn statt des Rohres ein weicher Aderschlauch angeschlossen ist, kann das Volumen der Pumpkammer unter Dehnung des Aderschlauches verringert werden und die Fließrichtung wird durch die Klappen vorgegeben. Zur Verdeutlichung dieses Vorgangs wird nicht das ganze Rohr gegen den Schlauch ausgetauscht, sondern ein elastisches Reservoir (Pumpmodul ohne Ventile) eingefügt, dessen Dehnung man gut beobachten kann, siehe Abbildungen 6 und 8. Der wesentliche Teil der in einem Pumpzyklus transportierten Flüssigkeitsmenge wird erst nach dem Loslassen der Pumpkammer und dem Schließen der Auslassklappe transportiert; dann ist der Druck im Reservoir und Aderschlauch größer als in der Pumpkammer und erst mit dem Abfluss des Wassers aus dem Aderschlauch durch die Einlassklappe stellt sich eine Druckdifferenz zwischen Reservoir und Pumpkammer ein, die die Strömung antreibt.

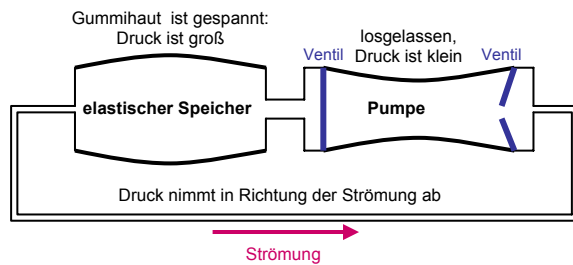


Abbildung 6: Zur Erklärung des Pumpvorgangs

6. Durchführung einer Unterrichtsreihe

Das vorgestellte Konzept wurde in der neunten Klasse eines Gymnasiums erprobt. Der gegebene Zeitrahmen von sechs Stunden war knapp bemessen. In den ersten beiden Stunden wurde das Modell behandelt (Abschnitt 6.1), in zwei weiteren Stunden wurden die physikalischen Zusammenhänge erarbeitet (6.2), schließlich wurden die Erkenntnisse in der folgenden Stunde auf die medizinische Situation übertragen (6.3). Die abschließende sechste Stunde diente zur Wiederholung und abschließender Beantwortung von Fragen zur Vorbereitung auf eine schriftliche Überprüfung.

6.1. Motivation des Modells

Gemäß den Erkenntnissen, dass ein fachübergreifendes Thema das Interesse der Schülerinnen und Schülern weckt, erfolgte der Einstieg über die gegenseitige Wahrnehmung des Herzschlages, und zwar paarweise mit Hilfe von Hörrohren [22] (Abbildung 7).



Abbildung 7: Wahrnehmung der Herztöne mit dem Hörrohr im Schülerexperiment: Das Hörrohr funktioniert gut durch die Kleidung hindurch.

Im anschließenden Gespräch haben die Schülerinnen und Schüler Fragen zum Thema Herz gestellt, u. a. zum Blutdruck, Aufbau des Herzens, und Herzkrankungen. Die verschiedenen Möglichkeiten der Informationsbeschaffung wurden diskutiert. Wegen der Unmöglichkeit, Menschen invasiv zu untersuchen, wurde der Bau eines Modells als notwendig erkannt. Dieses Modell wurde in der folgenden Stunde vom Lehrer mitgebracht. Gemeinsamkeiten und Unterschiede von Modell und Herzkreislaufsystem wurden thematisiert und der Wassertransport im Modell wurde phänomenologisch eingeführt. In Kleingruppen wurden Ventile (Abbildung 3) auseinandergeschraubt, um deren Funktion zu verstehen. Schon jetzt konnte die Erkenntnis

abgeleitet werden, dass der Doppelschlag des Pumpgeräusches nichts mit dem doppelten Aufbau der Herzkammern zu tun hat, weil er auch im einfachen Modell wahrnehmbar ist.

6.2. Lernziele in Physik

Nachdem das Modell akzeptiert und verstanden war, wurden stärker physikalisch orientierte Experimente durchgeführt, zuerst der Versuch zum Strömungswiderstand aus Abschnitt 5.3. Im Rahmen eines Wettbewerbs sollten zwei Schüler möglichst viel Wasser in das Auffanggefäß pumpen. Dadurch waren vergleichbare Antriebsbedingungen gegeben und der Schüler mit dem dünneren Schlauch hat eindeutig weniger Wasser transportiert. Da das Gesetz von Hagen-Poiseuille nicht quantitativ behandelt wurde, war der Quotient der Wassermengen nicht bedeutsam.

Die zentrale Erkenntnis, dass Druckunterschied Antrieb einer Strömung ist, wurde anhand eines Widerspruchserlebnisses erarbeitet. Zunächst hat eine Schülerin den Pumpvorgang im bereits bekannten Kreislaufmodell ihrer Alltagsvorstellung entsprechend anhand von Abbildung 5 (linke Seite) erklärt. Dann wurde das Modell, welches nun allerdings mit einem starren Kupferrohr ausgestattet war, erneut ausprobiert; das Pumpen war nicht möglich und der scheinbare Defekt musste aufgeklärt werden. Das Modell konnte durch Schüler „repariert“ werden, indem wie in 5.3. erklärt ein elastischer Zwischenspeicher eingefügt wurde (Abbildung 8).



Abbildung 8: Experiment zum Pumpmechanismus: Kupferrohr und elastischer Zwischenspeicher.

6.3. Lernziele in Medizin

Die Anwendung des erworbenen physikalischen Verständnisses erfolgte wieder im medizinischen Kontext. Bei der Blutdruckmessung wurde die hier übliche Einheit mmHg verwendet, um die Schülerinnen und Schüler für medizinische Sachverhalte

kompetent zu machen. Die SI-Einheit Pascal ist in Hinblick auf die weitgehend qualitative Diskussion unbedeutend und kann später beim Schweredruckeingeführt werden. Bei der Blutdruckmessung werden zwei Werte, nämlich der systolische und der diastolische Wert angegeben, z.B. 120/80mmHg. Der erste Wert bezeichnet den Druck in der Nähe des Herzausgangs während der Kontraktion des Herzmuskels; er ist leicht zu verstehen. Der diastolische - für die medizinische Diagnose bedeutendere - Wert während der Ruhephase des Herzmuskels müsste auf den ersten Blick Null sein. Tatsächlich misst man hier den Druck in den Arterien, welcher durch die Aderspannung allein aufrecht erhalten wird. Dieser Druck treibt den Blutstrom während der relativ langen Ruhephase des Herzmuskels an, ganz analog zur Funktion des Modells, wie sie in Abschnitt 5.4 beschrieben wurde. Der venöse Blutdruck in Herznähe ist mit ca. 6mmHg vernachlässigbar gering, so dass der gemessene arterielle Druck mit der Druckdifferenz zwischen Beginn und Ende des Aderkreislaufs näherungsweise gleichgesetzt werden kann. Als Arteriosklerose bezeichnet man den Verlust der Elastizität und die Verengung von Blutgefäßen durch Ablagerungen. Die Schülerinnen und Schüler können beide Aspekte in ihre physikalische Erklärung einbeziehen, da Strömungswiderstand und die Bedeutung der Aderelastizität in unabhängigen Experimenten demonstriert wurden. Die Arteriosklerose ist Ursache für gefährliche Herz-Kreislauf-Erkrankungen wie Hypertonie, Angina pectoris, Schlaganfall und Herzinfarkt. Mit dem Verständnis der Ursache-Wirkungs-Kette haben die Schülerinnen und Schüler unter anderem einen sachlichen Zugang zu den Gefahren des Rauchens, jedenfalls wurde dieser Aspekt intensiv diskutiert.

6.4.Vorbereitung der Wärmelehre nach dem Karlsruher Modell

Die Klasse, in der diese Unterrichtsreihe stattfand, wurde nachfolgend zum Thema Wärmelehre nach dem Karlsruher Modell unterrichtet. Obwohl der vorherige Unterricht konventionell aufgebaut war, hatten die Schülerinnen und Schüler keine Schwierigkeiten, mit den Begriffen Entropiestromstärke, Strömungswiderstand für Entropie (Wärmewiderstand) und Temperaturunterschied als Antrieb einer Entropiestromung zu argumentieren. Die ausführlich behandelte Flüssigkeitsströmung konnte zur Analogiebildung herangezogen werden. Die Extrapolation auf eine erfolgreiche Grundlagenbildung für elektrische Ströme erscheint plausibel.

7. Ausblick

Die erfolgreiche Durchführung des vorgestellten Konzeptes in einer Klasse ist ein erster Hinweis auf die theoretisch erwarteten Vorteile; weitere Unterrichtsversuche sollen folgen. Eine Kopplung weiterer fachübergreifender Themen an strukturorientierte

Unterrichtskonzepte, wie es z.B. für den Karlsruher Physikkurs bereits gefordert wurde [23], und die Erprobung in der Unterrichtspraxis werden zeigen, ob der vorgeschlagene Weg die prinzipiell erwarteten Vorteile bringt.

Literatur

- [1] COLICCHIA, Guiseppo: *Physikunterricht im Kontext von Medizin und Biologie*. Dissertation, LMU München (2002).
- [2] WODZINSKI, Rita: Mädchen im Physikunterricht. In: *Physikdidaktik in der Praxis*, hrsg. von KIRCHER, Ernst; SCHNEIDER, Werner B., Berlin: Springer, S. 27-46 (2003).
- [3] LABUDDE, Peter: Fächer übergreifender Unterricht in und mit Physik: Eine zu wenig genutzte Chance. In: *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* 1/2 (2003) S. 48-66.
- [4] LÜTTICKEN, Georg-Friedrich: Der Blutkreislauf als Einstieg in die Hydromechanik. In: *Unterricht Physik* 10(49) (1999) S. 28-31.
- [5] HERRMANN, Friedrich: *Der Karlsruher Physikkurs*. Köln: Aulis (1989).
- [6] HERRMANN, Friedrich, JOB, Georg: The historical burden on scientific knowledge. In: *Eur. J. Phys.* 17 (1996) S. 159-163.
- [7] STARAUSCHEK, Erich: Wärmelehre nach dem Karlsruher Physikkurs – Ergebnis einer empirischen Studie. In: *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* 1/1 (2002) S. 12-18.
- [8] Bader, Martin: *Vergleichende Untersuchung eines neuen Lehrgangs „Einführung in die mechanische Energie und Wärmelehre“*. Dissertation, LMU München (2001).
- [9] MUCKENFUSS, Heinz: Themen und Kontexte als Strukturelemente des naturwissenschaftlichen Unterrichts. In: *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* 2/3 (2004) S. 57-66.
- [10] BERGE, Otto Ernst: Physikalische und didaktische Aspekte des Druckbegriffs. In: *NiU-Physik* 1(5) (1990) S. 166-171.
- [11] WODZINSKI, Rita; OBERHOFFNER, Ingrid: Unterricht zum Druck in Flüssigkeiten und Gasen (2). In: *Physik in der Schule* 38(5) (2000) S. 299-303.
- [12] OBERHOFFNER, Ingrid; WODZINSKI, Rita: Unterricht zum Druck in Flüssigkeiten und Gasen (3). In: *Physik in der Schule* 38(6) (2000) S. 397-400.

- [13] BREDTHAUER, Wilhelm, et al.: *Impulse Physik I*. Stuttgart: Klett (1993).
- [14] MÜLLER, Rainer; WODZINSKI, Rita, HOPF, Martin (Hrsg.): *Schülervorstellungen in der Physik*. Köln: Aulis (2004).
- [15] KUHN, Wilfried, In: SCHEAFER, TROMMER, WENK (Hrsg.): *Denken in Modellen*. Braunschweig: Westermann (1977).
- [16] MIKELSKIS-SEIFERT, Silke; LEISNER, Antje: *Das Denken in Modellen fördern*. In: *Unterricht Physik* **14**(74) (2003) S. 82-84.
- [17] BENNER, Klaus-Ulrich: *Der Körper des Menschen*. Augsburg (1996).
- [18] KRUSE, Holger: *Über einen Versuch, den Druckbegriff am Beispiel der Blutdruckmessung einzuführen*. In: *NiU-Physik* **1**(5) (1990) S. 189-196.
- [19] MESCHÉDE, Dieter: *Gerthsen Physik*. Berlin: Springer (2003).
- [20] *Schläuche und Verbinder sind Laborversand erhältlich, z.B. Firma novodirect, Hafestraße 3, D-77694 Kehl. Hier wurde u. a. verwendet: Latex-Schlauch, Best. Nr. M13345; Schnellkupplung mit Absperrventil, Best. Nr. M95947; Durchflussanzeiger, Best. Nr. M87314.*
- [21] VON BARAVALLE, Herrmann: *Physik als reine Phänomenologie, Band I: Mechanik, Wärme und Kälte*. Stuttgart: Verlag Freies Geistesleben (1993).
- [22] *Herztonrohr nach PINARD, wie es normalerweise von Hebammen zur Untersuchung fetaler Herztöne verwendet wird. Vertrieb z. B. durch Rikepa Demo, Odenwaldring 18a, D-64747 Breuberg.*
- [23] STARAUSCHEK, Erich: *Elektrizitätslehre nach dem Karlsruher Physikkurs – Ergebnisse einer empirischen Studie*. In: *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* **1/2** (2003) S. 39-47.