

## Bau eines Experimentierkastens zum Thema Fluide

Jörg Gardill<sup>1,2</sup>, Jan-Peter Meyn<sup>1</sup>, Klaus Mecke<sup>2</sup>

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
Staudstraße 7, 91058 Erlangen

<sup>1</sup>Physikalisches Institut, Abteilung für Didaktik der Physik, [jan-peter.meyn@physik.uni-erlangen.de](mailto:jan-peter.meyn@physik.uni-erlangen.de)

<sup>2</sup>Institut für Theoretische Physik I, [klaus.mecke@physik.uni-erlangen.de](mailto:klaus.mecke@physik.uni-erlangen.de)  
und [joerg.gardill@physik.uni-erlangen.de](mailto:joerg.gardill@physik.uni-erlangen.de)

### Kurzfassung

Fluide sind wichtig in Technik, Umwelt und Medizin. Dennoch finden sie in Öffentlichkeit und Unterricht kaum Beachtung. Der Artikel stellt eine Staatsexamensarbeit vor, deren Ziel es ist diesem Missstand entgegen zu wirken.

Es wurde eine Experimentesammlung geschaffen, mit der sich Schüler in einem Lernzirkel mit dem Thema Fluide beschäftigen können. Die insgesamt neun Versuchsstationen des Experimentierkastens verteilen sich gleichmäßig auf die Themenschwerpunkte Fluidstatik, Fluidodynamik und Medizin. Im Artikel betrachten wir den Aufbau einiger ausgewählter Experimente zu Blutkreislauf, Oberflächenspannung, Schweredruck, Stromlinien und Wasserkraft im Detail.

### 1. Einleitung

Wer sich in unserer Umwelt nach der Relevanz der Fluide und der Fluidmechanik umsieht, braucht nicht lange zu suchen um fündig zu werden. In vielen Fachgebieten, wie Biologie, Medizin, Technik und Meteorologie sind Fluide von entscheidender Bedeutung. Im Folgenden sollen nur einige wenige Beispiele aus diesen Fachbereichen genannt werden:

Der Transport von Wasser, Kohlenstoffdioxid und Sauerstoff an die richtigen Stellen im Organismus ist Lebensgrundlage von Pflanzen und Tieren. Die dafür notwendigen Transportmechanismen, wie zum Beispiel die Leitbündel der Gefäßpflanzen oder der Blutkreislauf des Menschen, arbeiten nach fluidmechanischen Prinzipien.

Viele Tiere haben sich den sie umgebenden Fluiden und ihren Eigenschaften angepasst. Als Beispiele seien Wasserläufer (Oberflächenspannung), Fische (statischer Auftrieb) und Vögel (dynamischer Auftrieb) genannt. Ebenso wie Tiere nutzen Flugzeuge und Schiffe das sie umgebende Fluid.

In der Antriebstechnik werden Fluide in verschiedensten Anwendungen eingesetzt, im Auto beispielsweise als Treibstoff und zum Ansaugen und Mischen des Treibstoffs im Vergaser. Als Antrieb dienen Fluide auch in Wind- und Wasserkraftwerken. Diese nutzen die Energie des strömenden Fluids um elektrische Energie zu gewinnen.

Nicht zuletzt haben auch Gashoch- und Tiefdruckgebiete, ebenso wie Meeresströmungen und Winde, eine fluidmechanische Grundlage. Ihr Studium bildet einen Grundpfeiler der Meteorologie.

Im Unterricht fällt der Fluidmechanik häufig noch eine weitere Rolle zu. Bei der Einführung der Elektrodynamik wird auf die Analogie zur Hydrodynamik zurückgegriffen. Wird diese vorher nicht behandelt, so besteht die Gefahr, dass die Schüler ihre Fehlvorstellungen aus der Hydrodynamik in die Elektrodynamik transportieren.

Gründe, die Fluidmechanik im Unterricht zu behandeln, gibt es also viele. Lehrpläne die dies berücksichtigen eher wenige.

Das Archimedische Prinzip ist in immerhin elf von sechzehn Bundesländern im Lehrplan vorgeschrieben. Andere Themenbereiche der Fluidstatik, allen voran der „Druck in Flüssigkeiten und Gasen“, werden allerdings nur in der Hälfte der Bundesländer unterrichtet. Die Fluidodynamik findet schließlich nur in drei von sechzehn Lehrplänen überhaupt Erwähnung.

Ziel unserer Arbeit war die Entwicklung eines Experimentierkastens zum Thema Fluide. Auf diese Weise sollte eine zusätzliche Möglichkeit geschaffen werden, das Thema Fluide in den Unterricht zu bringen. Mit der transportablen, entleihbaren Experimentesammlung können Schüler auf praktische Art an Fluide herangeführt werden.

Der Kasten enthält Experimente zu den Bereichen Fluidstatik und Fluidodynamik, ebenso wie zum kontextorientierten Thema Medizin. Die Experimente sind in einem Lernzirkel angeordnet.

## 2. Lernzirkel Fluide

Ein Lernzirkel bietet sich in diesem Fall aus folgenden Gründen an: Mit vergleichsweise geringem Zeitaufwand wird eine große thematische Breite abgedeckt. Dies ist vor allem im Hinblick auf den engen zeitlichen Rahmen außerhalb des regulären Lehrplans wichtig. Der Lernzirkel bietet außerdem beliebige Einstiegspunkte in das weitläufige Thema. Alle Versuchsstationen können unabhängig voneinander behandelt werden.

Alle enthaltenen Experimente beschränken sich auf die Fluide Wasser und Luft, da diese einerseits zuverlässig in ausreichender Menge zur Verfügung stehen und andererseits nah an der Lebenswelt der Schüler sind.

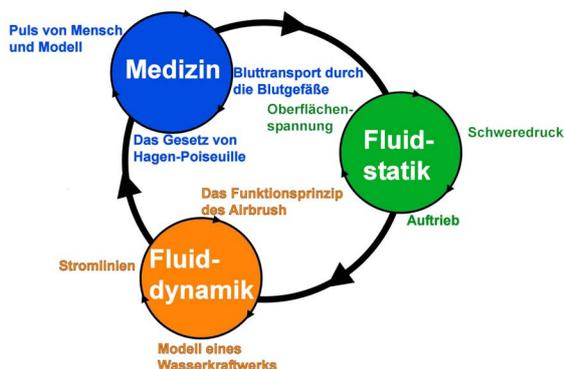


Abb. 1: Aufbau und Rotationsprinzip des Lernzirkels

Der Lernzirkel zum Thema Fluide enthält drei kleinere Lernzirkel zu den Themenschwerpunkten Medizin, Fluidstatik und Fluid-dynamik. Jeder dieser Themenschwerpunkte enthält wiederum drei Versuchsstationen und bildet damit einen kleinen Lernzirkel. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass bei einer Klassengröße von 25 Schülern (Bundesdurchschnitt in der Sek. I [1]) eine maximale Gruppengröße von drei Schülern nicht überschritten wird.

Für jede der Versuchsstation beträgt die Bearbeitungszeit circa 20 Minuten. Die Schülergruppen wechseln die Stationen im Uhrzeigersinn innerhalb eines Schwerpunkts. Innerhalb einer Stunde können alle Stationen eines Themenschwerpunkts behandelt werden. Die Gruppen gehen dann im Uhrzeigersinn in dem großen Zirkel zum nächsten Themenschwerpunkt. Die Bearbeitung des ganzen Lernzirkels nimmt, Pausen eingerechnet, etwa 3,5 Stunden in Anspruch.

An jeder der in Abb. 1 angegebenen Stationen können ein oder mehrere Experimente durchgeführt werden.

Bei den Versuchen handelt es sich zum Teil um Standardversuche die den Quellen der letzten 40 Jahren entnommen wurden, zum Teil um erweiterte oder neu erstellte Versuche.

Auf eine Auswahl dieser Stationen und Experimente wird im Folgenden genauer eingegangen.

## 3. Medizin

### 3.1. Puls von Mensch und Modell

An einem Kreislaufmodell mit handgetriebenem Herzmodell [2] und elastischem Latexschlauch kann der generelle Pumpmechanismus des Herzens verstanden werden. Die Wasserströmung kann am Strömungsanzeiger beobachtet werden.



Abb. 2: Modell des Blutkreislaufs

Neben dem Verständnis von Herzaufbau und -funktion, können am Modell auch Erfahrungen mit der Entstehung und Auskultation des Pulsgeräusches gemacht werden.

Da die Ader so dimensioniert ist, dass die Strömung laminar ist, ist es möglich, die nicht-invasive Blutdruckmessung am Modell zu verstehen.

Dazu wird ein Stethoskop auf die Ader gelegt und die Ader vor dem Stethoskop unterschiedlich stark komprimiert. Die Schaumstoffauflage (Abb. 3) besitzt einen Schlauchkanal, so dass der Schlauch nicht durch das Stethoskops zusammengedrückt wird.

Wird die Ader stark zusammengepresst, so fließt keine Flüssigkeit, es ist nichts zu hören. Bei leicht zusammengedrückter Ader ist der Druck der Systole ausreichend hoch, um Flüssigkeit zu fördern. An der Engstelle ist die Strömung turbulent und hörbar. In der entspannten Ader ist die Strömung laminar und nicht zu hören.

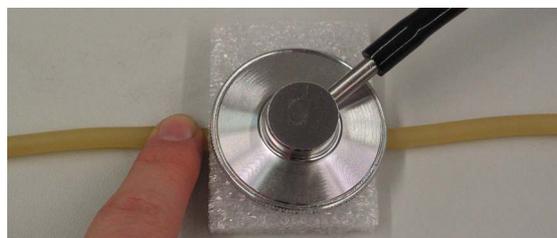


Abb. 3: Auskultieren am Modell

### 3.2. Bluttransport durch die Blutgefäß

Diese Station ist in zwei Teile unterteilt.

Zuerst wird ein weiteres Kreislaufmodell untersucht, in diesem Fall mit einem unelastischen Kupferrohr als Ader. Es ist dann keine Strömungserzeugung möglich.

In den Kreislauf kann jedoch mittels Schlauchkuppungen ein Aortamodell (ein elastisches Reservoir [2]) eingefügt werden, das den Pumpvorgang ermöglicht. So wird die entscheidende Rolle der Aderelastizität im menschlichen Körper verdeutlicht.



Abb. 4: Kreislauf mit eingebautem Aortamodell

Beim zweiten Experiment dieser Station handelt es sich um eine Modellvene. Die Venen des menschlichen Körpers besitzen (mit wenigen Ausnahmen) im Abstand von 4-7cm Rückschlagventile, dies sind die sogenannten Venenklappen. Sie verhindern den schwerkraftbedingten Blutfluss vom Herzen weg.



Abb. 5: Venenmodell

Das Modell besteht aus einem flexiblen (Härte: 55 Shore A) transparenten Silikonschlauch [3] mit einem für große Venen realistischen Innendurchmesser von 12mm. Die Funktion der Venenklappen wird im Modell von Kugelventilen übernommen.

Die Kugelventile können mit einer Standbohrmaschine aus massiven Aluminiumstücken mit Durchmesser 12mm und Länge 15mm gefertigt werden.

In die Oberseite dieser Stücke senkt man etwa 10mm mit einem 8mm HSS Kegelsenker mit 90° Steigung ein.

Das Stück zwischen Kegelspitze und Unterseite wird mit einem 2mm HSS Spiralbohrer durchbohrt. Bei den Kugeln handelt es sich um Kugellagerkugeln mit einem Durchmesser von 5.6mm.

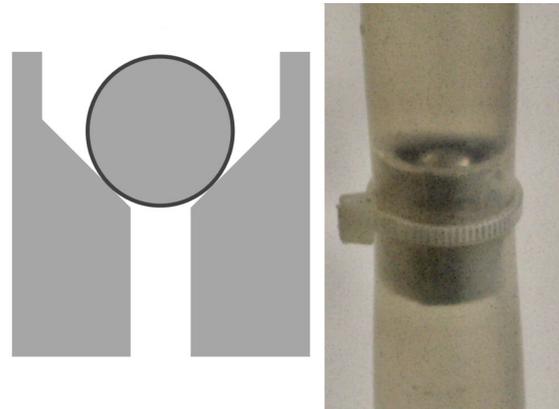


Abb. 6: Ventil des Venenmodells in Konstruktionsquerschnitt und Nahaufnahme

Über die Reduzierung des Schweredruckes hinaus, erfüllen die Venenklappen noch eine andere wichtige Funktion im Körper. Sie besitzen eine Pumpfunktion.

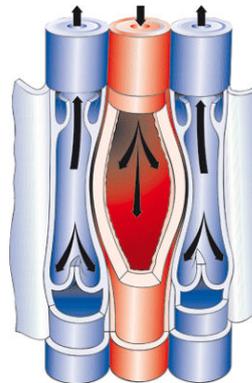


Abb. 7: Arterienpumpe; Abb. von [4]

Die meisten Körperven sind Begleitvenen, die parallel zu ihren arteriellen Gegenstücken verlaufen. Dehnt sich eine solche Arterie aufgrund des in ihr fließenden Bluts aus, so führt das zu einer Kompression in der benachbarten Vene. Dadurch wird aus diesem Klappenabschnitt in der Vene Blut verdrängt. Diese Strömung findet, bedingt durch die Rückschlagventile, in Richtung Herz statt.

Zieht sich die Arterie wieder zusammen, so dehnt sich die anliegende Vene wieder aus, beide Vorgänge resultieren aus Rückstellkräften der Gefäßwände. Dadurch kommt es in diesem Klappenabschnitt zu einem Unterdruck gegenüber den anliegenden Klappenabschnitten in der Vene. Blut fließt nach und gleicht dabei die Druckdifferenz aus.

Analog dazu arbeitet die Muskelpumpe mit dem Zusammenpressen des Venenabschnitts durch Kontraktion anliegender Muskeln. Sie spielt vor allem an den Beingefäßen eine wichtige Rolle.

Mit dem Venenmodell können die verschiedenen Aufgaben der Vene experimentell erfahren werden. Die Vene wird von Hand zusammengedrückt, beim Loslassen dehnt sie sich durch materialinterne Rückstellkräfte wieder aus.

Die dadurch entstandene Druckdifferenz zwischen dem Druck im Klappenabschnitt und dem Atmosphärendruck  $p_0$  wird durch Wasserströmung in die Vene ausgeglichen. Die Strömungsrichtung ist durch die Rückschlagventile vorgegeben.

#### 4. Fluidstatik

##### 4.1. Oberflächenspannung

Die Oberflächenspannung einer Flüssigkeit kann auf viele unterschiedliche Weisen gemessen werden. Ein Standardverfahren ist die Du-Noüy-Ringmethode [5]. Die Station ist ein Nachbau der entsprechenden Versuchsstation des Physikalischen Anfängerpraktikums der FAU.

Der Aufbau erlaubt die Bestimmung der Oberflächenspannung von Wasser (Literaturwert bei  $20^\circ$   $\sigma = 72.75 \frac{mN}{m}$ ) mit einer Genauigkeit von 5%.

Darüber hinaus stehen Ringe unterschiedlicher Materialien (PVC und Aluminium) und Radien (4cm und 3cm) zur Verfügung. Mit ihnen kann die Material- und Flächenunabhängigkeit der Oberflächenspannung gezeigt werden.

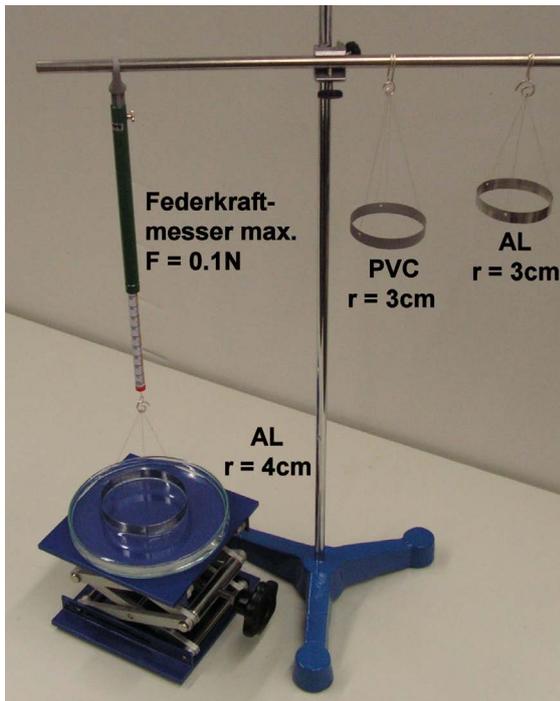


Abb. 8: Messung der Oberflächenspannung mit der Du-Noüy-Ringmethode

##### 4.2. Schweredruck

Das Einführungsexperiment dieser Station wird mit einem beidseitig offenen Plexiglaszylinder und einer Plexiglasplatte durchgeführt.

Es soll den Experimentierenden das selbstständige Entdecken der Schweredruck ermöglichen. Die Platte wird als Boden an den Zylinder gehalten und der nach oben offene Zylinder dann unter Wasser getaucht.

Die Bodenplatte des eingetauchten Zylinders muss nicht mehr festgehalten werden. Die Druckdifferenz zwischen Plattenoberseite im Zylinder und Plattenunterseite außerhalb des Zylinders verhindert das Ablösen der Platte (Bild 1 der Abb. 9).

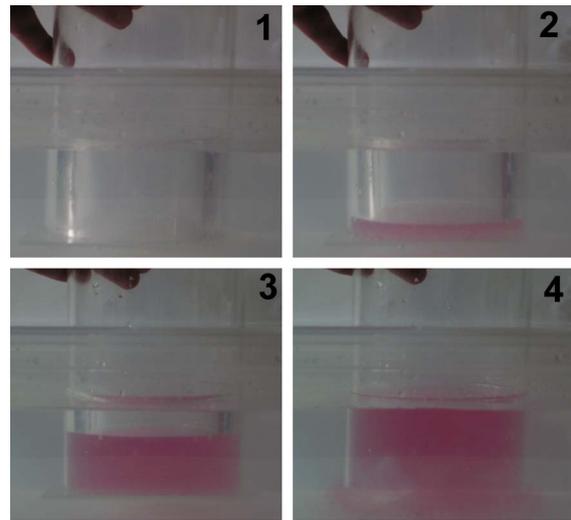


Abb. 9: Ablösezylinder in verschiedenen Stadien der Befüllung

Anschließend wird der Zylinder langsam mit gefärbtem Wasser befüllt (Bild 2 & 3 der Abb. 9). Wenn der Wasserstand im Zylinder den äußeren Wasserstand erreicht herrscht Druckgleichgewicht und die Platte löst sich vom Zylinder (Bild 4 der Abb. 9). Damit das Experiment gut funktioniert müssen zwei Grundbedingungen erfüllt sein. Erstens muss der Zylinderrand plan sein, da sonst Wasser zwischen Platte und Zylinder eindringt. Zweitens muss die Dichte des Plattenmaterials möglichst nah an, allerdings knapp höher als die von Wasser gewählt werden. Plexiglas erfüllt diese Bedingung sehr gut.

Als zweites Experiment dieser Station folgt mit dem Ausflussgefäß ein Standardexperiment des Unterichts über Schweredruck. Bei dem verwendeten Zylinder handelt es sich um eine umgebaute Sprudelsäule (siehe Abb. 10).

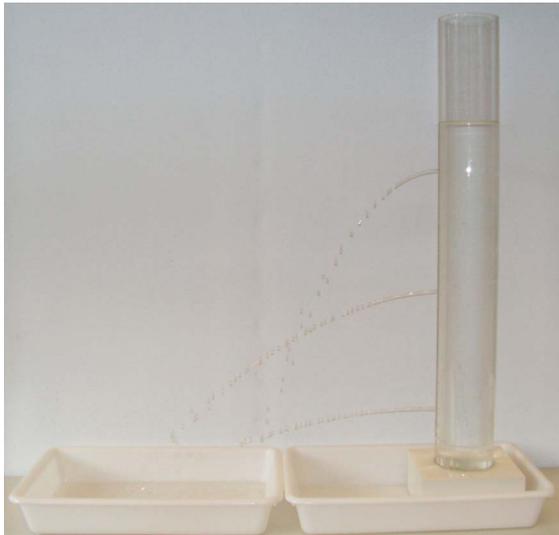


Abb. 10: Das Auslaufgefäß demonstriert die Druckzunahme mit der Wassertiefe

Die Abhängigkeit des Wasserdrucks von der Wassertiefe ist am Austrittswinkel der Wasserstrahlen aus dem gefüllten Zylinder zu erkennen.

Das Experiment kann darüber hinaus erweitert werden. Die Ausflusslöcher wurden mit Gewinden versehen. Passende Schrauben, mit Dichtungsringen aus Gummi, ermöglichen das luft- und wasserdichte Verschließen der Ausflusslöcher.

Verschließt man auf diese Weise die oberen beiden Ausflussöffnungen und dichtet das obere Ende der Säule mit Frischhaltefolie ab, so bildet sich über der Wasseroberfläche ein Unterdruck gegenüber  $p_0$  aus (Abb. 11). Wenn der Druck am unteren Loch auf  $p_0$  gesunken ist, kommt der Ausfluss zum Erliegen.

Man kann nun eines der beiden oberen Löcher öffnen. Auf Höhe des oberen geöffneten Loches stellt sich der Druck  $p_0$  ein. Zwischen den beiden geöffneten Löchern befindet sich die wirksame Wassersäule. Der ein- (Luft) und austretende (Wasser) Volumenstrom ist näherungsweise konstant.



Abb. 11: Unterdruck über der Wasseroberfläche

Nach dem gleichen Prinzip wird mit der Mariotteschen Flasche in Biologie, Chemie und Physik (z.B. [6]) ein konstanter Volumenstrom erzeugt.

## 5. Fluidynamik

### 5.1. Stromlinien

Strömungskanäle gibt es in vielen unterschiedlichen Ausführungen. Bei dem hier gewählten Aufbau handelt es sich um einen modifizierten Vorschlag aus [7]. Die Wasserströmung wird aus dem Wasserhahn gespeist. Die Stromfadenmarkierung erfolgt durch drei aus Glaskapillaren gezogene Düsen. Deren Durchfluss kann über Schlauchklemmen für jede Düse einzeln reguliert werden. Die Wasser wird mit Uranin, dem wasserlöslichen Natriumsalz des Fluorescins [3], gefärbt.

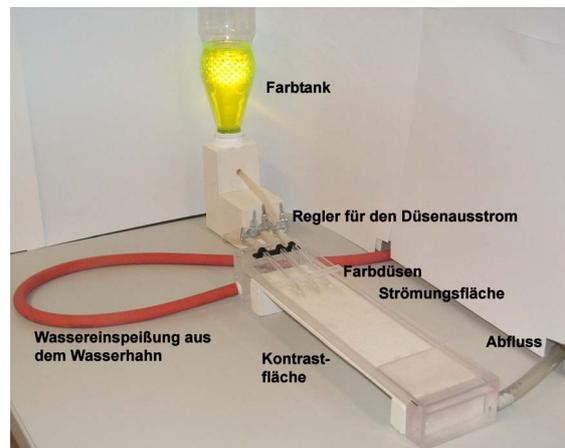


Abb. 12: Strömungskanal

Mit den markierten Stromfäden und verschiedenen Strömungshindernissen liefert das Experiment Anschauung für die im Alltag häufig unreflektiert verwendete Bezeichnung „stromlinienförmig“ und den damit zusammenhängende Begriff der Stromlinie. Abb. 13 zeigt den Kanal mit eingelegerter Verengung.

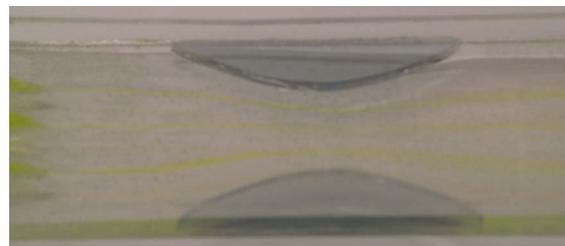


Abb. 13: Stromlinien an einer eingefügten Engstelle

## 5.2. Modell eines Wasserkraftwerks

Das Thema Wind- und Wasserkraft findet man bereits häufig in Lehrplänen, vor allem im Bereich „Natur und Technik“ oder in der Elektrizitätslehre. An dieser Station soll es mit einem Schwerpunkt auf dem Antriebsmedium betrachtet werden.

Wasserkraftwerke unterteilt man im Wesentlichen nach ihrer Fallhöhe in Niederdruck-, Mitteldruck- und Hochdruckanlagen. Von ihrem jeweiligen Einsatzgebiet ist auch die Wahl der Turbinen abhängig. Es gibt eine ganze Reihe verschiedener Turbinen. Die drei wichtigsten sind sicherlich die Kaplan-Turbine, die Francis-Turbine und die Pelton-Turbine, sie sind nach ihrem jeweiligen Erfinder benannt. Die meisten anderen Turbinen sind Varianten und/oder Weiterentwicklungen der Genannten.

Will man ein vollständiges Wasserkraftwerkmodell mit Wasserspeicher und Druckleitung betreiben, so ist es wichtig, dass der Wasserspeicher während der Versuchsdurchführung nicht zu oft nachgefüllt werden muss. Die Pelton-Turbine zeichnet sich unter anderem durch ihren vergleichsweise geringen Wasserdurchsatz aus, was sie zur besten Turbine für das Modell macht.

Natürlich kann man dieses Problem umgehen, indem man das Wasserkraftwerkmodell am Wasserhahn betreibt. Solche Modelle sind auch bei vielen Lehrmittelherstellern (z.B. [9]) im Angebot. Bei einem Betrieb am Wasserhahn handelt es sich allerdings um eine massive Verzerrung der Realität. Den Schülern kann so weder ersichtlich werden, dass die Wassergeschwindigkeit aus der Fallhöhe des Wassers resultiert, noch dass die Laufzeit des (Speicher-)Kraftwerks durch die Menge des gespeicherten Wassers begrenzt ist. Der Sinn eines Stauesees und der Druckleitung kann sich aus solchen Modellen nicht erschließen.

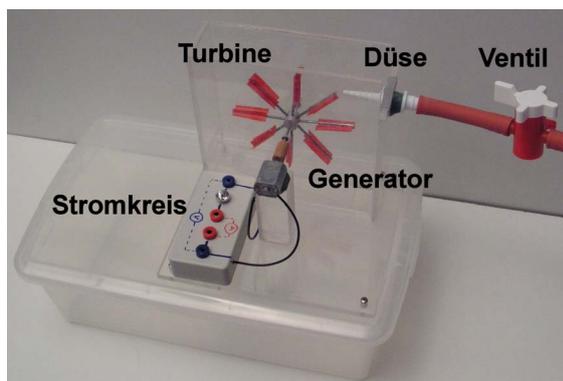


Abb. 14: Modell eines Wasserkraftwerks

In unserem Modell verwenden wir einen Wasserspeicher (mit Schlauchanschluss versehene 8l Petflasche), der in einer Fallhöhe von bis zu 3 Metern über der

Turbine aufgestellt oder aufgehängt werden kann.

Bei der Druckleitung handelt es sich um einen GSR Gummischlauch [8] mit 9mm Innendurchmesser. Das Auffangbecken ist als Wanne unter dem Turbinengehäuse direkt in das Modell integriert.

Von Wasserspeicher, Auffangbecken und Druckleitung abgesehen besitzt das Modell fünf Komponenten (siehe Abb. 14).

Das Ventil reguliert den Volumenstrom durch die Düse. Auf diese Weise kann die Leistung eingestellt werden. Ein Schlauchreduzierstück [8] wird im Modell als Düse eingesetzt, der Düsenquerschnitt beträgt  $\varnothing_{\text{Düse}} = 2.7\text{mm}$ .

Die Turbine arbeitet nach dem Pelton-Prinzip. Der auf die Schaufel auftreffende Wasserstrahl wird an der Mittelscheide geteilt, so dass je 50 % des Wassers in beide Schaufelhälften (Becher) eintreten. Es wird dann (im Modell) um ca.  $150^\circ$  umgelenkt (siehe Abb. 15) und gibt dabei einen großen Teil seiner Energie durch Impulsübertragung an die Turbine weiter.



Abb. 15: Pelton Rad vor dem Deutschen Museum München und im Modellbetrieb

Als Generator verwendet man einen kleinen Elektromotor. Die Dimensionierung einer Freistrahlturbine hängt von Generatorzahl, Wasserdurchsatz und Fallhöhe ab [10]. Der Strahldurchmesser  $D_m = 2R_m$  bezeichnet den zweifachen Abstand zwischen senkrecht auftreffendem Wasserstrahl und Turbinenachse, er berechnet sich aus :

$$D_m = 2.63k_m \frac{d_0}{n_q} \quad (5.1)$$

$k_m$  ist die Laufzahl, sie ist als Verhältnis der Umfangsgeschwindigkeit auf dem Strahlkreis zur Strahlgeschwindigkeit definiert. Die Leistung einer Pelton Turbine ist theoretisch für  $k_m = 0.5$  optimal, in der Praxis wählt man  $k_m$  etwas kleiner, da das Wasser sonst nach dem Impulsübertrag nicht abfließt.  $d_0$  bezeichnet den Strahlquerschnitt, wir nehmen vereinfachend  $d_0 = \varnothing_{\text{Düse}}$  an.

Die spezifische Drehzahl  $n_q$  berechnet sich aus Drehzahl  $n$ , Volumenstrom  $Q$  und Fallhöhe  $h$ , sie wird in der Dimension der Drehzahl ( $\frac{1}{\text{min}}$ ) angegeben.

$$n_q = n \frac{Q}{h^{\frac{3}{2}}} \quad (5.2)$$

Bei den gegebenen Werten und einer Leerlaufdrehzahl des Motors von  $5000 \frac{1}{\text{min}}$  (hier verwendet) wäre der optimale Turbinendurchmesser ca. 2cm. Kleine unübersetzte Elektromotoren mit geringerer Drehzahl sind schwer zu finden. Eine Übersetzung bedingt allerdings massive Reibungsverluste und Anlaufschwierigkeiten.

Unsere Turbine besitzt einen Durchmesser von 10.5cm, sie ist also deutlich vergrößert dimensioniert so dass beste Sichtbarkeit der Einzelteile gewährleistet ist.

Die Schaufeln mit jeweils 3cm Länge wurden im Modell aus Cocktailstrohhalm mit  $\varnothing = 8\text{mm}$  gefertigt. Dazu wurden diese der Länge nach aufgeschnitten. Gegenüber des Schnitts wurde der Trinkhalm dann entgegen der Krümmung gefalzt (geht am besten mit einer langen Zange).

Die so entstandene Mittelscheide fixiert man mit Sekundenkleber, so dass die Mittelscheide 1-2mm weit zusammenklebt, bevor sie sich in die Bechern öffnet. Die gesamte Schaufel ist dann etwa 15mm breit.

Aufgrund der starken Krümmung der Strohhalme kann es nötig sein, die Schaufeln seitlich um jeweils 1mm zu kürzen, damit das Wasser nicht auf die Rückseite der nächsten Schaufel auftrifft.

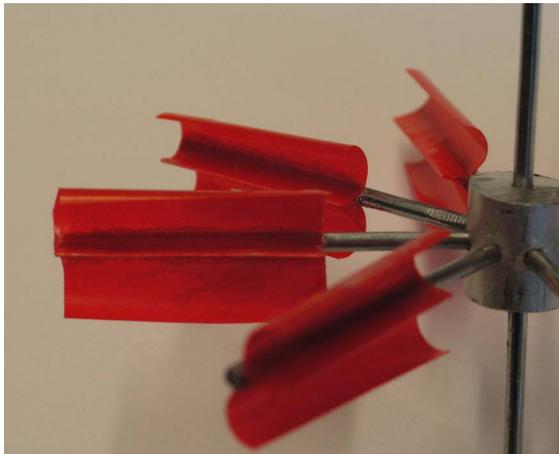


Abb. 16: Pelton Schaufeln aus Strohhalmen

Die Radachse mit Durchmesser  $\varnothing = 12\text{mm}$  besteht aus Aluminium. Als Schaufelstreben und Verbindungsachse zum Motor eignet sich Bügeldraht. Es ist wichtig, die Radachse möglichst präzise zu bohren, da sonst der Wasserstrahl später nicht auf die Mittelscheiden der Becher trifft. Geringe Abweichungen der Bohrungen können jedoch durch Zurechtbiegen des Drahtes korrigiert werden.

Um Reibungsverluste möglichst weit zu reduzieren, wird die Turbinenachse im Gehäuse durch Miniaturkugellagern [11] geführt.

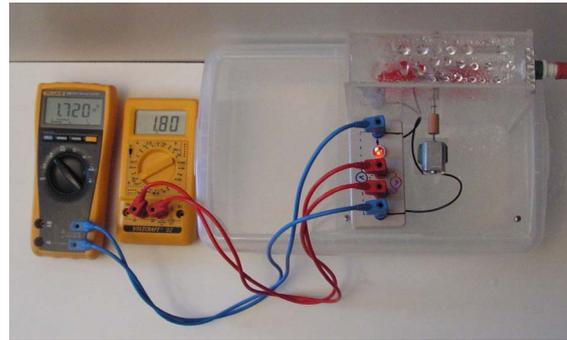


Abb. 17: Pelton-Modell im Betrieb

In Abb. 17 ist die Spannungs- (in V) und Strommessung (in mA) am Modell bei angeschlossener LC Diode und einer Fallhöhe von 3m zu sehen.

Im Kurzschlussbetrieb wird am Modell eine Spannung von  $U = 1.97\text{V}$  bei einer Stromstärke von  $I = 24.1\text{mA}$  gemessen.

Der Bau eines solchen Wasserkraftwerkmodells ist aufwändig, jedoch mit einer einfachen Werkstattausstattung machbar. Es bestehen zahlreiche Möglichkeiten das Modell zu optimieren, etwa bei der Wahl des Generators, der Optimierung der Schaufelablenkung und der Reduzierung der Verluste in Druckleitung und Düse.

Zudem bieten sich viele interessante Unterrichtsansätze zum Thema Fluidmechanik, Energietechnik, Elektrotechnik. Daher eignet es sich nach Meinung des Autors auch als größeres (Bastel-)Projekt oder Facharbeitsthema für Schüler.

## 6. Literatur

- [1] Kultusministerkonferenz, Bundesministerium für Bildung und Forschung: OECD-Veröffentlichung „Bildung auf einen Blick“, Wesentliche Aussagen in der Ausgabe 2007, S. 21f. [http://www.bmbf.de/pubRD/bildung\\_auf\\_einen\\_blick\\_07\\_wesentliche\\_aussagen.pdf](http://www.bmbf.de/pubRD/bildung_auf_einen_blick_07_wesentliche_aussagen.pdf) (Stand: 4/2011)
- [2] J.-P. Meyn: Einführung in die Hydromechanik im fachübergreifenden Kontext. In: Physik und Didaktik in Schule und Hochschule, 1/5 (2006), S. 28-34
- [3] Laborversand neoLab Migge Laborbedarf-Vertriebs GmbH, Rischerstr. 7-9, D-69123 Heidelberg. Hier wurde verwendet Standard-Silikonschlauch Best.-Nr. E-4205, Uranin CI 45350 Best.-Nr. 1130.0100, Schlauchklemme 10mm Best.-Nr. 1-3010 <http://www.neolab.de/> (Stand: 5/2011)

- [4] <http://www.schwabe.de/schwabe/Anwendungen/Venenschwache/Entstehung.php> Websiteverantwortlicher W. Schwabe (Stand: 3/2011)
- [5] W. Walcher: Praktikum der Physik. Wiesbaden: Teubner (2006), S. 75-77
- [6] J.A. Maroto, J. de Dios, F.J. de las Nieves: Use of a Mariotte bottle for the experimental study of the transition from laminar to turbulent flow. In: American Journal of Physics 7/70 (2002), S. 698-701
- [7] H.F. Meiners: Physics Demonstration Experiments, Volume 1. American Association of Physics Teachers (1970)
- [8] Laborversand Novodirect GmbH, Hafenstraße 3, D-77694 Kehl. Hier wurde verwendet Verbinder PP Reduzierstück 4-8/8-12mm Best.-Nr. 8895N, GSR Gummischlauch Best.-Nr. 56646, Ventil 2 Wege 9-11mm Best.-Nr. 50068 <http://www.novodirect.de/> (Stand: 5/2011)
- [9] Lehrmittelhersteller Phywe Systeme GmbH und Co. KG - Robert-Bosch-Breite 10 - D-37079 Göttingen. Der erwähnte Artikel besitzt die Best.-Nr. P1431300 <http://www.phywe-systeme.com/> (Stand: 5/2011)
- [10] Zh. Zhang: Freistrahlturbinen, Hydromechanik und Auslegung. Berlin: Springer (2009), S. 15-23
- [11] Kugellager-Shop, Inhaber Bianka Zündorf, Bismarckstraße 64, D-13585 Berlin. Verwendet wurden Miniaturkugellager 68/2.5 ZZ, 2.5x6x2.6mm <http://www.kugellagershopberlin.de/> (Stand: 5/2011)