

Konstruktion und Ermittlung der physikalischen Vorgänge des hydraulischen Widders

Wettbewerb "Jugend Forscht" 2007

Julian Kohrs (18 Jahre)

**Arbeitsgemeinschaft "Jugend Forscht"
des Christian-Gymnasiums Hermannsburg
Leitung: StD Thomas Biedermann**

Inhaltsverzeichnis

1.	Die Idee zum Thema	3
1.1.	Zielsetzung	3
2.	Funktionsweise eines hydraulischen Widders	3
3.	Bau des hydraulischen Widders	4
3.1.	Wahl der Materialien	4
3.2.	Das Stoßventil	4
3.3.	Das Steigrohr	5
3.4.	Das Gestell	5
4.	Physikalische Berechnungen	6
4.1.	Die Kraft	6
4.2.	Die Gegenkraft	7
4.3.	Die Federkonstante	7
4.4.	Der Wirkungsgrad	7
5.	Eigene Messungen	8
5.1.	Erster Versuchsdurchlauf	8
5.2.	Zweiter Versuchsdurchlauf	9
5.3.	Dritter Versuchsdurchlauf	9
6.	Abschließende Überlegungen	9
7.	Literatur	9
8.	Internet-Adressen	9
9.	Danksagung	9

1. Die Idee zum Thema

Die Idee bekam ich durch ein Buch, auf welches ich durch den Titel aufmerksam geworden bin: „Vergessene Erfindungen“ von Christian Mähr. Beim Überfliegen des Inhaltsverzeichnis wurde ich besonders auf eine Überschrift aufmerksam. Da stellte ich mir schon die erste Frage „Was soll denn bitteschön ein hydraulischer Widder sein“? Auf Seite 65 fand ich dann wider Erwarten kein Tier sondern mitunter das Letzte, womit ich gerechnet hatte: eine Wasserpumpe. Es handelt sich hierbei jedoch um keine einfache Pumpe wie man sie an einem Ende des Gartenschlauches findet, denn der hydraulische Widder pumpt ganz ohne elektrische Energie oder irgendwelche Motoren: diese Pumpe wird allein durch die Lageenergie des Wassers in Bewegung gehalten. Als ich dann noch lesen musste, dass ein hydraulische Widder normalerweise nur exakt zwei bewegliche Teile haben soll, habe ich den Entschluss gefasst: das werde ich genauer unter die Lupe nehmen.

1.1. Zielsetzung

Da über hydraulische Widder bereits alles bekannt ist, hatte ich hier nur wenig Spielraum. Deshalb beschloss ich, einen einfachen Widder zu konstruieren und dann mit dem physikalischen Wissen, das mir zur Verfügung steht, alle Vorgänge, die während des Wassertransportes durchlaufen werden, zu erfassen und weitgehendst zu berechnen.

2. Funktionsweise eines hydraulischen Widders

Das Prinzip eines hydraulischen Widders entpuppt sich bei näherem Hinsehen als relativ einfach. Das nach oben zu befördernde Wasser fließt aus dem Wasserbehälter a.) durch das Fallrohr b.). Dort trifft es auf das offene Stoßventil c.), welches daraufhin schließt. Dadurch entsteht augenblicklich eine Art „Druckwelle“, die das geschlossene Druckventil d.) öffnet, durch welches das Wasser nun kurzzeitig in das Steigrohr e.) fließen kann. Sobald der Druck wieder abgebaut ist, schließt das Druckventil wieder, wodurch verhindert wird, dass das Wasser aus dem Steigrohr zurückfließt. Da sowohl durch das Druckventil als auch durch das Stoßventil, welches sich nun wieder öffnet, Wasser entwichen ist, kann aus dem Wasserbehälter wieder neues Wasser nachfließen und das Prozedere wiederholt sich. Das

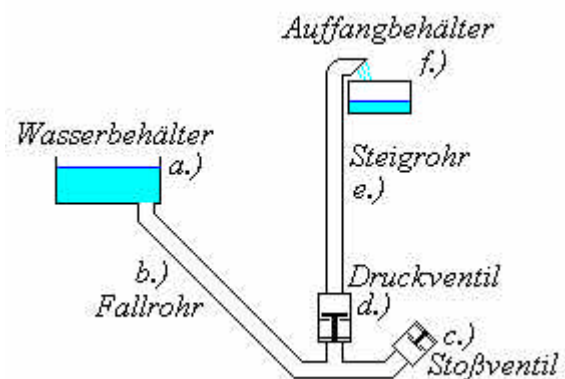


Abb. 1: Schematischer Aufbau eines hydraulischen Widders

Steigrohr wird so mit der Zeit angefüllt bis letztendlich Wasser in den Auffangbehälter f.) fließt.

3. Bau des hydraulischen Widders

Als ich mit dem Thema begonnen habe, hatte ich nicht mehr Informationen als die Zeichnung aus dem Buch und ein paar Kommentare zu derselben. Ich habe mir mehrmals durch den Kopf gehen lassen, ob mir das als Grundlage genüge oder ob ich zur Sicherheit noch eine Internetrecherche zu diesem Thema durchführe, da ich dem Buch prinzipiell schon das nötigste über die Vorgänge im Widder entnehmen konnte. Schließlich entschied ich mich dazu, es erst einmal zu versuchen und nur andere Quellen hinzuzuziehen, falls sich Probleme häufen sollten.

3.1. Wahl der Materialien

Für die Rohre des hydraulischen Widders wählte ich 18 mm dickes Kupferrohr, da dies eine gängige Größe ist und sich dafür ausreichend Aufsätze und Ventile finden, die sich durch einfaches Löten miteinander verbinden lassen. Da der Widder nicht allzu groß ausfallen sollte, wählte ich als Fallrohrlänge 75 cm, was bei einem Winkel von 45° zwischen Fallrohr und Wasserbehälter einer Fallhöhe von etwa 53 cm entsprechen würde. Der Wasserbehälter ist ein einfacher Eimer, als Druckventil dient ein normales Rückstoßventil.

3.2. Das Stoßventil

Bei der Wahl der Materialien kam mir in den Sinn, dass es eine entscheidende Rolle spielt, wann das Stoßventil schließt, da ein großer Teil des Wassers aus eben diesem Ventil entweicht. Wie viel Wasser pro Ventilschluss den Widder an dieser Stelle verlässt, hängt in erster Linie davon ab, wie schnell das Ventil schließt. Ich hielt es deshalb für wichtig, diesen Faktor beeinflussen beziehungsweise verändern zu können. Zu diesem Zweck wählte ich für

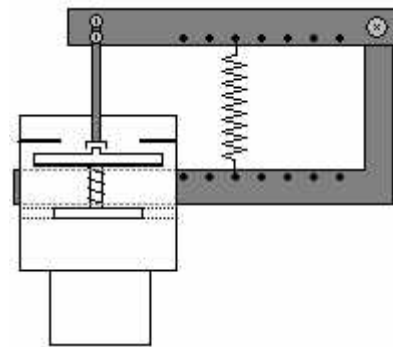


Abb. 2: Skizze des Stoßventilaufsatzes

dieses Ventil ein Rückstoßventil, welches im Normalzustand in Fliessrichtung verschlossen ist. Um dieses Ventil zu öffnen baute ich einen Aufsatz für das Ventil, welcher direkt am Ventil angebracht ist und dieses öffnet, indem ein durch eine Feder gezogener Metallstab das Ventil aufdrückt. Der Aufsatz (in Abb. 2. Grau gekennzeichnet) hat mehrere Löcher, in die eine Feder eingespannt werden kann. Zwischen zwei Löchern liegt etwa ein Zentimeter.

Wie groß die durch die Feder angebrachte Kraft auf das Ventil ist, lässt sich mit Hilfe des Hebel-Gesetzes erklären. Das Hebelgesetz besagt, dass das Produkt aus der Länge eines Hebelarmes und der an diesem Arm angebrachten Last gleich dem Produkt der Länge des anderen Hebelarmes und dessen Last ist.

$$F_1 * l_1 = F_2 * l_2 \quad F = \text{Last}; l = \text{Länge}$$

Dies lässt sich mit meiner Konstruktion vergleichen: Die Länge vom Armgelenk bis zur Feder ist der erste Hebelarm, die Feder, die diesen Arm zieht, ist wie die Last, die diesen Arm nach

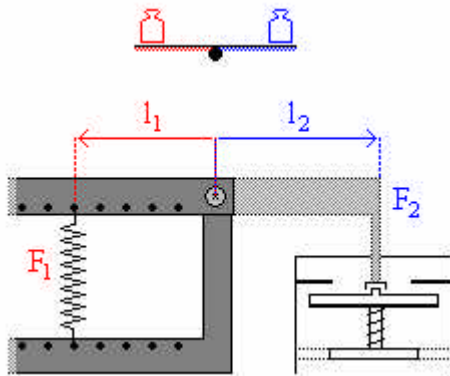


Abb.3: Anwendung des Hebelgesetzes auf den Ventilaufsatz

unten drückt.

Der zweite Arm ist in diesem Fall die Länge vom Armgelenk bis zum Ventil. Die Kraft, mit welcher dieser Arm nach unten gedrückt wird, ist die Folge des Zuges der Feder, die am ersten Lastarm angebracht ist. Mit Hilfe des Hebelgesetzes kann man nun bestimmen, welche Kraft auf das Ventil ausgeübt wird, sofern man die Federhärte kennt. Würde die Feder nun umgespannt werden, würde sich auch die Kraft,

welche das Ventil öffnet, verändern. Auf diese hat man selbst mit nur einer Feder mehrere Variationsmöglichkeiten. Konkrete Berechnungen und Erläuterungen folgen im Verlauf der Arbeit.

3.3. Das Steigrohr

Das Steigrohr sollte anfangs, wie auch die übrigen Rohre des Widders, aus Kupferrohr bestehen. Jedoch kam mir der Gedanke, dass die Länge des Steigrohrs ebenfalls Einfluss auf den Wirkungsgrad des Widders haben kann. Aus diesem Grunde, sowie aus Kosten- und Platzgründen habe ich mich dazu entschlossen, das Steigrohr durch drei verschieden lange Wasserschläuche zu ersetzen, die über einen wasserdichten Schraubverschluss am Widder angebracht und mit wenigen Handgriffen ausgewechselt werden können. Einer der Schläuche hat eine Höhe von 1 Meter, der zweite ist 1,50 Meter hoch und der dritte 2 Meter.

3.4. Das Gestell

Schon nachdem die grobe Form des Widders entstanden war stellte ich fest, dass dieser unmöglich von alleine stehen könne. Aus diesem Zweck baute ich nun ein Gestell aus alten Holzteilen. Auf einer Grundplatte befestigte ich mittig im rechten Winkel eine weitere, die etwas kleiner als der Widder selbst ist. Daran montierte ich fünf Schellen, die es mir ermöglichen sollten, den Widder einerseits zu stabilisieren und andererseits jederzeit leicht aus dem Gestell herausnehmen zu können.

Später fiel mir auf, dass es günstiger wäre, wenn ich in die Bodenplatte unter dem Ventil ein Loch säge, worunter man eine Wanne oder etwas ähnliches stellen kann, damit das Wasser aus dem Stoßventil aufgefangen wird und ich somit meine Versuchsdurchläufe auch innerhalb von Gebäuden starten könne.

4. Physikalische Berechnungen

4.1. Die Kraft

Neben der Höhe ist der einzig variable Faktor bei meinem Widder die Feder. Meine Überlegung zu derselben war, dass jene so gewählt werden müsste, sodass das Ventil möglichst spät schließt. Auf diese Weise gewinnt das Wasser im Fallrohr mehr Geschwindigkeit, bevor das Ventil schließt, was zu Folge hat, dass die Druckwelle, die beim Schließen des Ventils entsteht, größer sein müsste. Also galt es zu berechnen, mit welcher Kraft das Wasser gegen das Ventil drückt, um eine entsprechende Feder zu schneiden.

Die Kraft kann man aus dem Druck berechnen und der Größe der Fläche, auf die dieser Druck wirkt.

$$F = p * A \quad F = \text{Kraft}; p = \text{Druck}; A = \text{Fläche}$$

Der Druck an sich ist von der Höhe der Wassersäule abhängig und an allen Stellen gleich. Er ergibt sich aus dem Produkt der Dichte der Flüssigkeit, der konstanten Erdbeschleunigung und der bereits erwähnten Höhe der Wassersäule.

$$p = \rho * g * h \quad \rho = \text{Dichte}; g = \text{Erdbeschleunigung}; h = \text{Höhe}$$

Die Dichte von Wasser beträgt genau 1000 g/cm^3 , die Erdbeschleunigung ist an dieser Stelle der Erde $9,81 \frac{\text{N}}{\text{m}}$. Der Wassersäule entspricht hier die Fallhöhe des Widders, also 0,53 Metern.

In die oben genannte Formel eingesetzt ergibt sich also für den Druck

$$p = \rho * g * h = 0,52 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2}$$

Diese Größe kann nun für die erste Formel verwendet werden.

Die zweite fehlende Größe zu ermitteln, also die Fläche des Ventilplättchens, ist recht schwierig, da es sich hier um ein kleines Objekt handelt, welches dazu noch in das Ventil fest eingearbeitet ist. Deshalb enthält der gemessene Wert von 2 cm als Durchmesser der Platte mit Sicherheit einen Messfehler, den ich nicht zu korrigieren vermag. Verwende ich diesen Wert, ergibt sich eine Oberfläche von $39,47 \text{ cm}^2$ und zusammen mit dem Druck entspräche dies einer Kraft von

$$F = p * A = 20,53 \text{ N}$$

4.2. Die Gegenkraft

An dieser Stelle benötige ich nun das Hebel-Gesetz. Ich habe nun die Kraft auf einer Seite des Hebels und eine Hebellänge (die Gesamtlänge vom Gelenk der Aufsatzes bis zu dem Stab, welches das Ventil öffnet) und kann die Länge des anderen Hebels frei wählen. In diesem Fall

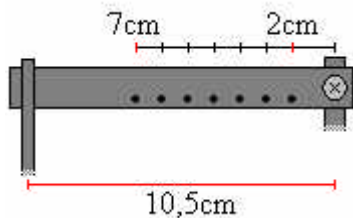


Abb.4: Länge der beiden Hebel

wähle ich eine Länge von 5cm, da ich die fertig angepasste Feder dann sowohl mit einem längeren als auch mit einem kürzeren Hebelarm testen kann. Nun muss ich diese Werte nur in die Formel des Hebelgesetzes einsetzen, um die Kraft zu berechnen, mit welcher die Feder das Ventil öffnen muss, sodass es im

Versuchsdurchlauf möglichst spät schließt. Es ergibt sich:

$$F_1 * l_1 = F_2 * l_2$$
$$F_1 = \frac{F_2 * l_2}{l_1} = 43,092 \text{ N}$$

4.3. Die Federkonstante

Mit dieser Kraft ist es mir nun möglich zu berechnen, welche Härte die optimale Feder haben muss. Die Federhärte wird durch die Federkonstante angegeben, die sich wie im Folgenden berechnet :

$$D = \frac{F}{s} \quad D = \text{Federkonstante}; s = \text{Federlänge}$$

Hiermit kommt eine neue Variable hinzu: die Federlänge. Diese kann ich zwar gewissermaßen auch frei wählen, jedoch muss sie zusammen mit der Federkonstante die entsprechende Gegenkraft erzeugen, was meine Möglichkeiten andererseits wieder stark eingrenzt.

Nachdem ich mehrere Tabellen aufgestellt hatte, die die Federlänge und die dazugehörige Federkonstante aufführten, suchte ich nach einer geeigneten Feder, was sich nach kurzer Zeit als recht aussichtslos erwies. Also machte ich es mir zu nutze, das sich die Federkonstante einer Feder verdoppelt, wenn man ihre Länge halbiert. Schon beim ersten Versuch hatte ich Erfolg: Ich konnte eine zwei Zentimeter lange Feder zurechtschneiden, welche die Federkonstante 1990 N/m hatte. Der Ideale Wert wäre 2155 N/m, doch in anbetracht dessen, das die meisten meiner Werte gemessen wurden und somit Messfehler enthalten, erachte ich diese Abweichung von knapp 8% als im Rahmen der Messgenauigkeit ausreichend.

4.4. Der Wirkungsgrad

Unter dem Wirkungsgrad eines Energiewandlers, und nichts anderes ist der hydraulische Widder, versteht man die nutzbare Energie, die dieser umwandeln kann. Der Wirkungsgrad wird für gewöhnlich in % angegeben.

Den Wirkungsgrad des hydraulischen Widders ermittle ich durch die potentielle Energie, die in diesem System umgewandelt wird. Die potentielle Energie kann man mit dieser Formel berechnen:

$$E = m * g * h \quad E = \text{Energie}; m = \text{Masse}; h = \text{Höhe}$$

Ich betrachte hierbei die Höhe des Wasserbehälters als Ausgangsniveau (Abb.4.). In dem Fall wäre die Höhe am Anfang gleich null, woraus folgt, dass auch die potentielle Energie zu Beginn 0 ist. Die für mich nutzbare Energie ist nun das Wasser, das von diesem Null-Niveau aus auf ein Höheres gebracht wurde. Diese Energie errechnet sich aus:

$$E_1 = m_1 * g * h_1$$

Die für mich nicht nutzbare Energie ist folglich alles Wasser, das auf einem niedrigeren Niveau den Widder verlassen hat.

$$E_2 = m_2 * g * h_2$$

Da ich damit alle Energien erfasst habe, muss nach dem Energieerhaltungssatz gelten:

$$m_1 * g * h_1 + m_2 * g * h_2 = 0$$

In diesen Berechnungen wurde die Reibung vernachlässigt. Die entsprechende Ergänzung folgt in der Auswertung konkreter Messwerte.

5. Eigene Messungen

In diesem Abschnitt meiner Arbeit präsentiere ich Messwerte aus eigenen Versuchsdurchläufen mit dem selbst gebauten hydraulischen Widder und eine Berechnung des Wirkungsgrades aus den mir zur Verfügung stehenden Werten.

5.1. Erster Versuchsdurchlauf

Den ersten Versuchsdurchlauf führte ich mit dem ein Meter langen Schlauch durch. Von den zehn Litern, die ich in den hydraulischen Widder eingefüllt habe, sind 170 Milliliter durch den Schlauch geflossen. In die obigen Formeln eingesetzt ergäbe sich daraus ein Wirkungsgrad von etwa 1,5 %. Dies ist recht enttäuschend, wenn man es mit den modernen Widdern vergleicht, die es bei einer Förderhöhe von mehreren hundert Metern auf über 20% Wirkungsgrad bringen, für die Mittel jedoch, die mir zur Verfügung standen, ist das Ergebnis recht ansehnlich.

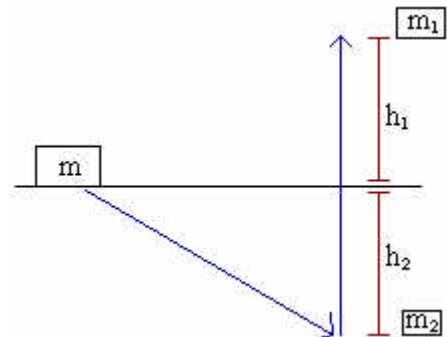


Abb.4: Schema des Wirkungsgrades des hydraulischen Widders

5.2. Zweiter Versuchsdurchlauf

Für den zweiten Durchlauf wählte ich einen höheren Schlauch. Es galt nun, eine Förderhöhe von 1,50 Metern zu erreichen. Mit der gleichen Ausgangsmenge an Wasser kamen so 135 Milliliter Wasser aus dem Schlauch, was immerhin einem Wirkungsgrad von 2,5% entspricht. Das ist immer noch deutlich weniger als das heutzutage zu erreichende Maximum.

5.3. Dritter Versuchsdurchlauf

Der dritte Versuchsdurchlauf wurde nun mit dem 2 Meter langen Schlauch durchgeführt. Auf eine Auswertung verzichte ich jedoch, von den zehn Litern kein einziger Tropfen den Schlauch verlassen hat.

6. Abschließende Überlegungen

An meiner Konstruktion lassen sich noch unzählige Kleinigkeiten verbessern, denn jeder abgenommene Messwert hat Messfehler in sich. Diese sind für mich unvermeidbar, könnten aber zum Beispiel durch eine maschinelle Herstellung des Widders stark reduziert werden. Die Gesamtheit dieser Fehler ist sicher einer der Faktoren, die mich von dem 20%-igen Wirkungsgrad einen großen Schritt entfernten. Wie ich später im Internet lesen musste, sollte auch die Höhe des Fallrohres größer gewählt werden.

Bei den meisten Widdern, die ich im Nachhinein im Internet fand, war zwischen Druckventil und Steigrohr auch ein „Windkessel“ angebracht, der den Wirkungsgrad des Widders weiter steigert, indem er die Wassersäule, die angehoben werden muss, verkleinert.

7. Literatur

[1] „Vergessene Erfindungen“, Christian Mähr, Weltbild-Verlag 2002

8. Internet-Adressen

<http://home.arcor.de/wasserwiddler.html> (Genehmigung vom Autor der Seite erhalten)

9. Danksagung

Ich bedanke mich bei Herrn Biedermann, welcher mit mir wieder geduldig wie kein zweiter war und immer ein offenes Ohr für Fragen sämtlicher Art hatte, sowie bei Gisela Seidel und der Firma „Tschiskale“, die mir Muffen und Kupferrohr sponsorten. Ebenfalls möchte ich meinen Eltern dafür Danken, das sie mir geholfen haben, wo sie nur konnten, selbst wenn sie das um ihre Freizeit brachte.