



# Eine quantifizierbare Wasserturbine aus Standardbauteilen

JO BECKER – BERNHARD HORLACHER – HANS-MARTIN TREIN

Im Technik- und Physikunterricht sollten Möglichkeiten zu einer freien Gestaltung von eigenen Ideen gefunden werden. Die Umwandlung von Energie bietet dazu eine günstige Möglichkeit. In diesem Beitrag wird eine Wasserturbine vorgestellt, bei der das wichtigste Bauteil, das Turbinenrad, nach eigenen Ideen als Schüler/innen-Experiment hergestellt werden muss. Der Wirkungsgrad der fertigen Anlage kann quantitativ getestet werden, eine Differenzierung nach Lernstand sowie eine Verknüpfung mit benachbarten Fachbereichen (wie bspw. Physik) sind sehr gut möglich.

## 1 Angebote auf dem Lehrmittelmarkt

Die Umwandlung von elektrischer Energie aus Wasserkraft spielt eine wichtige Rolle bei der regenerativen Energiege-

winnung. Im Internet gibt es viele gute Materialien von Energieversorgern, um die Theorie dazu zu er- bzw. bearbeiten. Einige Anbieter von Lehrmitteln bieten Modelle an, um Wasserkraft zu demonstrieren und auch zu messen, allerdings sind

diese Geräte meist kostspielig (bspw. Cornelsen, pasco, Leyboldt) und lassen nur wenig Spielraum für eigene Versuchsvarianten. Das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) bietet einen eintägigen Kurs für Schulklassen (Klassen 9–12) an, bei dem ein großes überschlächtiges Wasserrad gebaut wird und quantitativ vermessen wird. Leider ist dieses Wasserrad nicht für den regulären Unterricht verfügbar, da es zu groß und zu schwer ist. Gleichzeitig verzeichnete der Wettbewerb *Energiegeladen* der Ingenieurkammer Baden-Württemberg im Jahr 2012 über 700 Schüler/innengruppen, die ein möglichst leistungsfähiges Wasserrad bauen sollten. Im Folgenden sollen diese Tatsachen verknüpft werden, indem ein Modell für den regulären Schulunterricht entwickelt wird, das experimentelle Gestaltungen zulässt und damit zu verschiedenen technischen Lösungen kommt.

## 2 Eigene Entwicklung

Ziel war die Konstruktion einer robusten Wasserturbine aus leicht zugänglichen Teilen (siehe Abb. 1), die von der Lehrkraft mit normalem Handwerkszeug gebaut werden kann. Zudem stellten wir uns den Anspruch, dass eine Messung leicht erfolgen und die Bereitstellung der Apparatur innerhalb kürzester Zeit möglich sein muss. Der entscheidende Vorteil des Modells besteht darin, dass die Schüler/innen das Turbinenrad aus 6 gleichen Alublechen und 2 CDs nach eigenen Vorstellungen selbst bauen können. Die Formung der Alubleche kann frei gewählt werden und ist entscheidend für den Wirkungsgrad. Die Alubleche können auf die CDs geklebt oder geschraubt werden. Innerhalb einer Doppelstunde sollten Messergebnisse vorliegen und die Anlage sollte in verschiedenen Klassenstufen einsetzbar sein, sowohl in der Sekundarstufe I (Bau einer optimalen Turbinenschaufel), als auch in der Sekundarstufe II (Wirkungsgrade der verschiedenen Baugruppen).

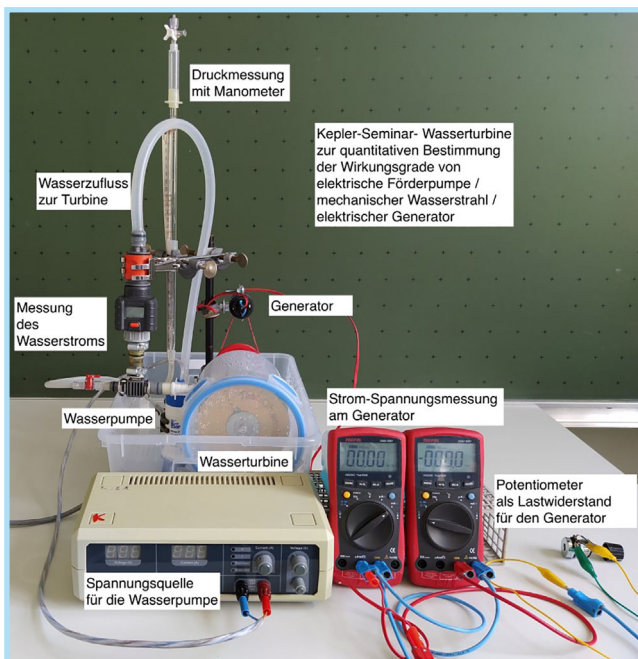


Abb. 1. Gesamtapparatur mit Messgeräten zur Leistungsmessung

## 3 Aufbau der entwickelten Apparatur

Die Anordnung ist an einer Stativstange befestigt und muss zum Betrieb in eine Plastikwanne gestellt werden. Es muss so viel Wasser eingefüllt werden, dass die Tauchpumpe immer Wasser ansaugt. Zum Einbau oder Wechsel des Turbinenrads wird der Deckel der Plastikdose geöffnet. Zentrales Bauelement ist eine Hinterradnabe (1) vom Fahrrad mit 36 Speichenlöchern, also 18 Löcher auf jeder Seite. Diese 18 Löcher ermöglichen eine Befestigung der Kunststoffdose (2) mit 6 Schrauben.

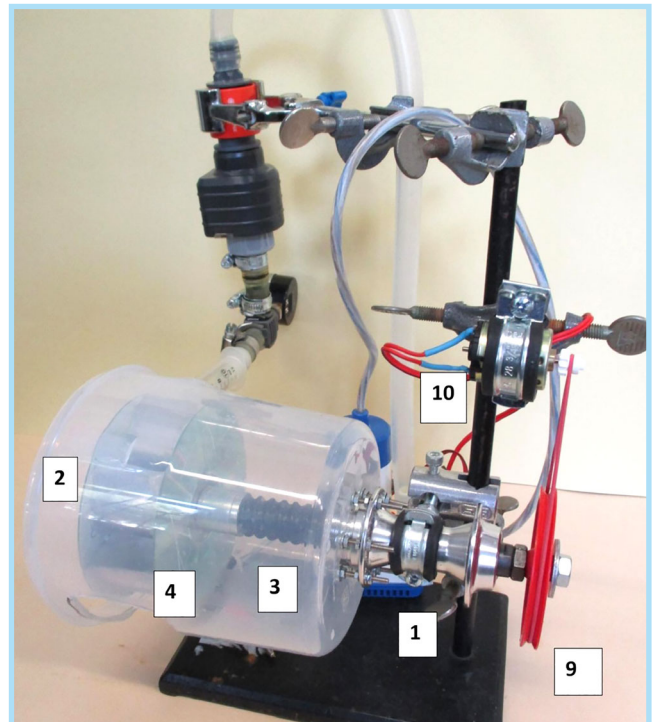


Abb. 2. Turbine von der Seite

Die Dose hat unten eine große Öffnung, damit das zugeführte Wasser abfließen kann.

Auf der Nabenachse (1) sitzt ein Drehteil (3) zur Aufnahme des Turbinenrads (4). Diese Anordnung ist die einfachste und sicher auch robusteste Möglichkeit Drehbewegungen technisch umzusetzen. Als Düse (5) wird eine Schlaucholive verwendet; Druck und Volumenstrom sind über die Austrittsöffnung variierbar. Die Wasserversorgung erfolgt durch eine 12 Volt Wasserpumpe (6), bei der der Strom und die Spannung gemessen werden können. Die mechanische Leistung der Wasserpumpe erfolgt über die Messung des Volumenstroms mit Hilfe eines Wassermengenmessers aus dem Gartenbereich (7) und dem Druck mit Hilfe eines Manometers (8a) oder mit einem selbst gebauten Druckmesser (8b). Die selbst gebaute Variante hat den Vorteil, dass der gewünschte Messbereich über die Wahl der aufgesetzten Spritze eingestellt werden kann.

Die mechanische Leistung der Turbine wird über ein Kunststoffrad (9) auf einen kleinen Elektromotor (10) übertragen, der als Generator angetrieben wird. Für die Übertragung ist ein Gummi besser geeignet als ein Getriebe. Damit wird der Aufbau einfacher, wenn eine größere Übersetzung (hier ca. 20:1) erreicht werden soll.

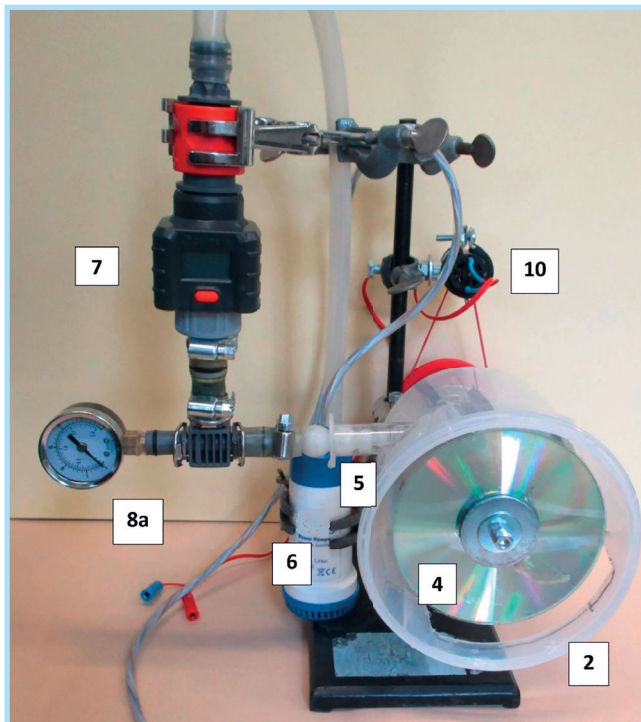


Abb. 3. Geöffnete Turbine von vorne



Abb. 4. Turbine mit Steigrohr zur Druckmessung

Mit dieser Anordnung sind alle notwendigen Parameter zu den einzelnen Wirkungsgraden quantitativ messbar. Der Wirkungsgrad der Gesamtanordnung hängt dann nur noch von der physikalisch besten Geometrie und der handwerklichen Sorgfalt beim Zusammenbau der Turbine ab.

#### 4 Bau des Turbinenrades (geeignet für die Sekundarstufe I)

Alle Schüler/innengruppen bekommen die gleichen Bauteile aus 2 CDs und 6 gleichen, halbharten 0,5 mm Alublechen (40 x 60 mm), sowie verschiedene Körper zur Formung der Schaufelgeometrie. Die Schüler/innen sollen sich eine günstige Form der Schaufeln überlegen und technisch umsetzen. Das kleine Brett mit Stab dient zum korrekten axialen Aufkleben der oberen CD.



Abb. 5. Bauteile für das Turbinenrad



Abb. 6. Turbinenrad vor dem Aufkleben der oberen CD

#### 5 Mögliche Messungen und Berechnungen

Es können alle Parameter gemessen werden, die zur Bestimmung der Wirkungsgrade notwendig sind:

- Spannung  $U_P$  und Stromstärke  $I_P$  zum Betrieb der Wasserpumpe
- Druck  $p_W$  und Wasserstromstärke  $I_W$  des Wasserstrahls
- Stromstärke  $I_L$  und Spannung  $U_L$  am Generator in Abhängigkeit vom Lastwiderstand



Damit können folgende Berechnungen durchgeführt werden:

- Elektrische Leistung der Pumpe  $p_p = U_p \cdot I_p$
- Mechanische Leistung des Wasserstrahls  $p_W = p_W \cdot I_W$
- Elektrische Leistung im Lastwiderstand  $p_L = U_L \cdot I_L$
- Mechanischer Wirkungsgrad der Pumpe  $\eta_p = p_W / p_p$
- Wirkungsgrad des Generators  $\eta_L = p_L / p_W$
- Gesamtwirkungsgrad  $\eta = \eta_L \cdot \eta_p$

## 6 Bestimmung des Wirkungsgrades der Wasserpumpe (geeignet für die Sekundarstufe II)

### 6.1 Messung des Wasserdrucks mit einem Druckmanometer

Mit einem Manometer kann man den Überdruck  $\Delta p$  direkt ablesen und kommt sehr schnell zu einem Ergebnis. Die Pumpe nimmt elektrische Leistung  $p_p = U_p \cdot I_p$  auf und erzeugt damit einen Wasserstrahl mit der mechanischen Leistung  $p_W = \Delta p \cdot V_W / t$ .

Ergebnisse einer Beispielmessung:

- Elektrische Leistung der Pumpe:  
 $p_p = 12,1 \text{ V} \cdot 3,0 \text{ A} = 36,3 \text{ W}$
- Wasserstrom:  
Volumenstromstärke:  $7,7 \text{ l/min}$   
Überdruck:  $\Delta p = 0,71 \text{ bar}$  (gemessen mit dem Manometer)  
Leistung:  $p_W = 710 \text{ hPa} \cdot 7,7 \text{ l/min} = 71000 \text{ Pa} \cdot 0,0077 \text{ m}^3 / 60 \text{ s} = 9,1 \text{ W}$
- Wirkungsgrad:  
 $\eta_p = p_W / p_p = 9,1 \text{ W} / 36,3 \text{ W} \approx 25\%$

### 6.2 Messung des Wasserdrucks mit Steigrohr und Volumenkörper als Manometer

Diese Variante der Messung ist etwas aufwändiger, aber gut geeignet um die physikalischen Zusammenhänge zu verstehen. Die Messung des Wasserdrucks kann mit einer leicht aufzubauenden eigenen Messapparatur bestimmt werden. Diese besteht aus einem U-Bogen (Schlauch) und einer Pipette mit aufgesetzter Spritze. Vor dem Zusammenbau bestimmt man das Gesamtvolumen  $V_0$  aus Pipette und aufgesetzter Spritze. Über das Gesamtvolumen von Spritze und Pipette ist eine Anpassung an den gewünschten Messbereich für den Druck möglich. Bei A wird der Schlauch mit dem Wasserstrom verbunden, der aus der Spritze auf das Wasserrad trifft. Durch Anheben oder Senken der Pipette erreicht man, dass der Wert 0 ml der Pipette auf der Höhe der Null-Linie liegt.

Abbildung 7 zeigt den drucklosen Zustand. Die Luft oberhalb der Null-Linie hat das Volumen  $V_0$ , der obere Dreiweghahn ist offen; der Druck im Luftvolumen  $V_0$  ist der äußere Luftdruck  $p_0$ . Nach Schließen des oberen Hahns kann die Pumpe in Betrieb genommen werden.

Abbildung 8 zeigt, wie bei Betrieb der Pumpe das Wasser ansteigt. Man misst den Anstieg  $h$  des Wasserspiegels und die Volumenabnahme  $\Delta V$ . Der Druck im Luftvolumen steigt auf  $p_L$ . Der Druck  $p$  im Wasser ist die Summe aus dem hydrostatischen Druck der Wassersäule, der Höhe  $h$  und dem Gasdruck  $p_L$  im Volumen  $V_L$ :



Abb. 7. Manometer drucklos

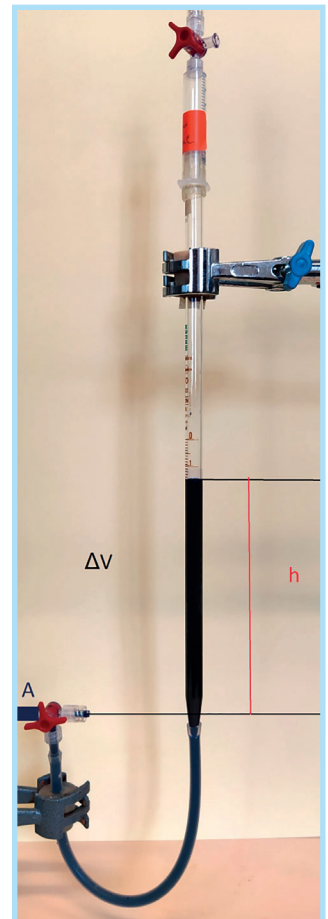


Abb. 8. Manometer im Betrieb

$$\text{Gesamtdruck: } p = g \cdot \rho_{\text{Wasser}} \cdot h + p_L$$

Der Druck  $p_L$  ergibt sich aus:  
 $p_0 \cdot V_0 = p_L \cdot (V_0 - \Delta V)$  als  $p_L = \frac{p_0 \cdot V_0}{V_0 - \Delta V}$

$$\text{Also: } p = g \cdot \rho_{\text{Wasser}} \cdot h + \frac{p_0 \cdot V_0}{V_0 - \Delta V}$$

Bei einer Messung ergeben sich bspw.:

$$V_0 = 25,0 \text{ ml}; p_0 = 981,5 \text{ mbar}, h = 16,5 \text{ cm} \text{ und } \Delta V = 8,8 \text{ ml}$$

Daraus ergibt sich:

$$p = 16,2 \text{ mbar} + \frac{981,5 \text{ mbar} \cdot 25 \text{ ml}}{(25 \text{ ml} - 8,8 \text{ ml})} \approx 16,2 \text{ mbar} + 1515 \text{ mbar} = 1531 \text{ mbar}$$

Für die Leistung des Wasserstroms ist die Druckdifferenz entscheidend:

$$\Delta p = p - p_0 = 1,53 \text{ bar} - 0,98 \text{ bar} = 0,55 \text{ bar}.$$

### 6.3 Bestimmung des Wirkungsgrades des Systems Wasserturbine-Generator

Der Wirkungsgrad der Wasserturbine hängt stark von der Form der Turbinenschaufeln ab.

Der Elektromotor, der als Generator verwendet wird, sollte einen relativ großen Innenwiderstand haben, damit eine einfache Einstellung über einen Lastwiderstand erfolgen kann um den mpp (maximum power point) zu ermitteln. Dazu wird

durch die Belastung des Generators mit einem Potentiometer, der (äußere) Lastwiderstand an den (inneren) Widerstand des Generators angeglichen und Spannung und Stromstärke gemessen. Die elektrische Leistung ergibt sich als Produkt:

$$P_L = U_L \cdot I_L$$

Der eingebaute Generator wurde mit einem veränderlichen Widerstand, 20  $\Omega$  bis 1 k $\Omega$  belastet.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Messwerte sowie deren grafische Auswertung (siehe Tab. 1):

U [in V]	I [in mA]	P [in mW]	R [in $\Omega$ ]
14,8	14,2	210	1042
13,9	20,6	286	675
12,8	26	333	492
11,6	33,6	390	345
10,5	41	431	256
9,3	49	456	190
8,6	53	456	162
6,5	66	429	98
5,8	73	423	79
4,7	80	376	59
3,7	86	318	43
2,7	92	248	29
0,24	110	26	2

Tab. 1. Messwerte bei Belastung mit einem Widerstand

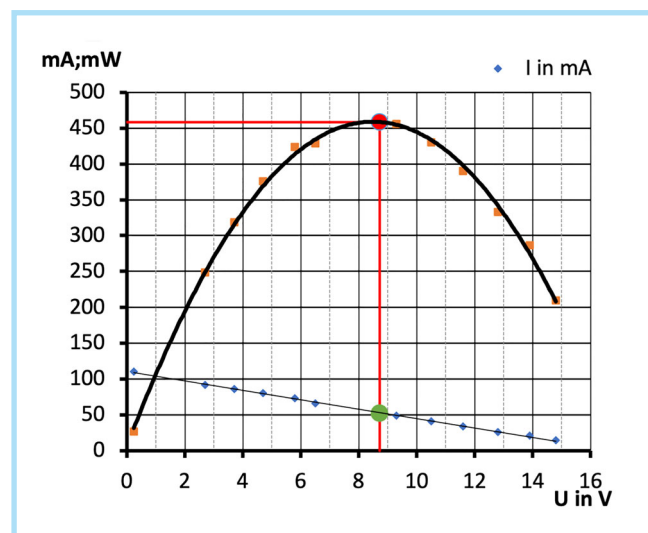


Abb. 9. Leistung über Spannung aufgetragen zur Ermittlung des mpp

Aus Abbildung 9 ergibt sich, dass im mpp  $U_L = 8,7\text{V}$  und  $P_L = 460\text{mW}$  elektrisch abgegeben werden. Der Lastwiderstand beträgt dann 165  $\Omega$ .

Der Wirkungsgrad Wasserstrahl / Generator ist  $\eta_L = 0,46\text{ W} / 9,1\text{ W} \approx 5,0\%$ . Bei genauerer Betrachtung ist der Wirkungsgrad der Turbine doppelt so groß, da der angelegte äußere Widerstand gleich dem inneren Widerstand des Generators ist. Verglichen mit einer professionellen Francis-Turbine ist das natürlich sehr wenig. Das Unterrichtsziel liegt auch nicht im Nachbau einer professionellen Turbine, sondern in der Diskussion über die physikalisch beste Form des Turbinenrades aus den vorgegebenen Materialien und der möglichst großen handwerklichen Sorgfalt beim Bau. Im Kraftwerk wird das System Turbine / Generator weit weg vom mpp betrieben, da bei maximaler Leistung die Wärmeleistung im Inneren des Generators gleich der nach außen abgegeben elektrischen Leistung wäre, dies würde den Generator thermisch zu stark belasten und wäre unwirtschaftlich.

## 7 Zusammenfassung

Die Fahrradnabe ist ein ideales Bauteil, um Drehbewegungen zu lagern und Körper gegeneinander zu verdrehen; die Belastungsgrenze der Lagerung wird im Schulbetrieb nicht erreicht. Mit der Anordnung sind auch weitere Anwendungen leicht umsetzbar, diese sollen in einem Folgeartikel dargestellt werden.

Sowohl Schüler/innen als auch Erwachsene beginnen sofort mit einer (sehr erwünschten) intensiven Diskussion, sobald die Bauteile für die Turbinenschaufel in der Hand gehalten werden. Die Ergebnisse für die Turbinenschaufeln unterscheiden sich häufig zwischen verschiedenen Gruppen oft um den Faktor 2 für den mpp und ermöglicht im Fachunterricht eine ausführlichere Behandlung von physikalischen Grundfragen.

### Zusatzinformationen

Zu den Versuchen finden sich Arbeitsblätter und ein Video in der Online-Ergänzung. Bei den Autoren ist eine bearbeitete Kunststoffdose und die Turbinenachse erhältlich, sowie Bestelladressen der übrigen Bauteile, bzw. auch die komplett aufgebaute Apparatur. Ein Kontakt kann gerne über die E-Mailadresse (siehe unten) erfolgen.

Arbeitsblätter zum Thema finden sich in der Online-Ergänzung zu diesem Artikel.



Jo BECKER war als Diplomingenieur und Elektronikentwickler in der Industrie tätig.

BERNHARD HORLACHER, horlacher@kepler-seminar.de, ist Leiter des SFL Kepler-Seminar e.V. Stuttgart.

HANS-MARTIN TREIN war Lehrer für Physik und Mathematik. ■