

# 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 Energiegewinnung. 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 Abbildung 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).

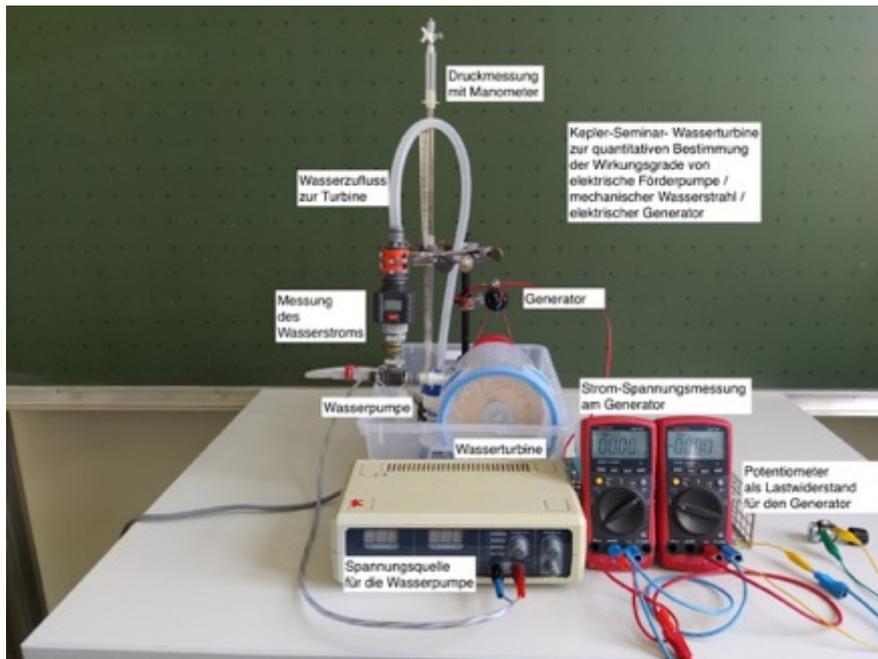


Abb. 1 Gesamtapparatur mit Messgeräten zur Leistungsmessung

### 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.

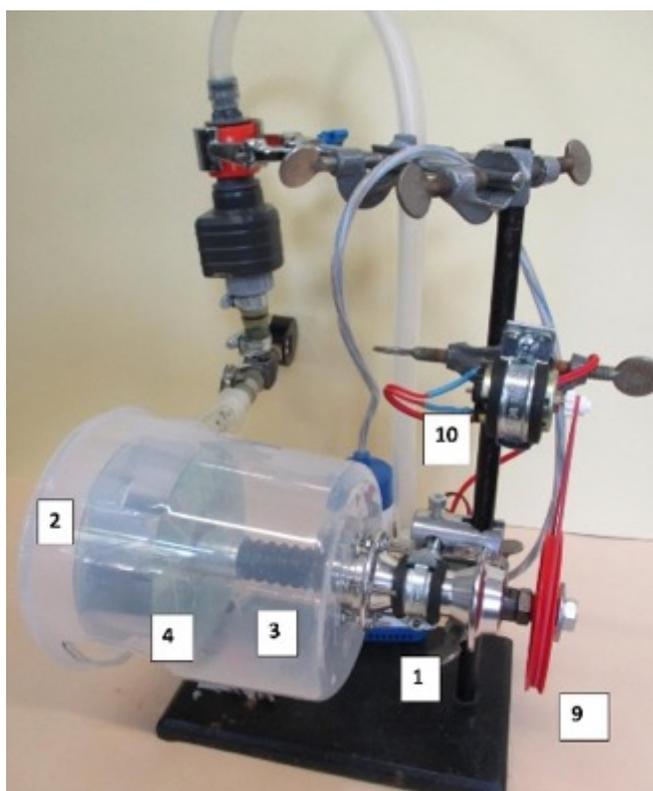


Abb.2  
Turbine von der Seite mit  
Fahrradnabe und Generator

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.

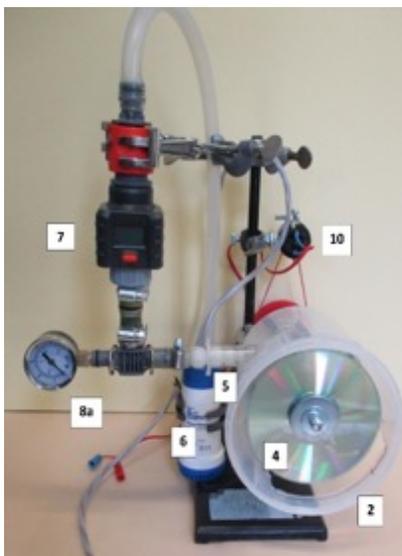


Abb3. Geöffnete Turbine mit Manometer als Druckmesser



Abb4 Turbine mit Steigrohr als Druckmesser

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.

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.

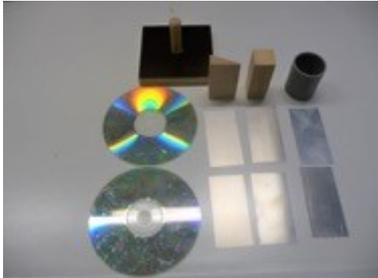


Abb. 5 Bauteile für das Turbinenrad



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:

- Kraft auf der Achse zur Messung der mechanischen Leistung
- 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:

- Mechanische Leistung der Wasserturbine  $P_T = F \cdot v$
- Mechanischer Wirkungsgrad:  $\eta_T = P_T / P_W$
- 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:  $P_p = 12,1V \cdot 3,0A = 36,3W$
- Wasserstrom:  $\text{Volumenstromstärke: } 7,7l/\text{min}$   
 $\text{Überdruck: } \Delta p = 0,71\text{bar (gemessen mit dem Manometer)}$   
 $\text{Leistung: } P_w = 710\text{hPa} \cdot 7,7l/\text{min} = 71000\text{Pa} \cdot 0,0077\text{m}^3/60\text{s} = 9,1W$
- Wirkungsgrad:  $\eta_p = P_w / P_p = 9,1W / 36,3W \approx 25\%$

### 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.

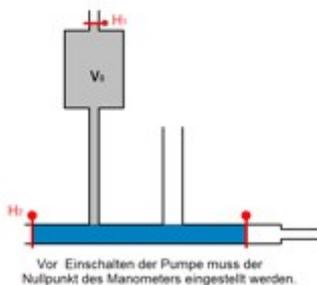


Abb. 8 Manometer drucklos

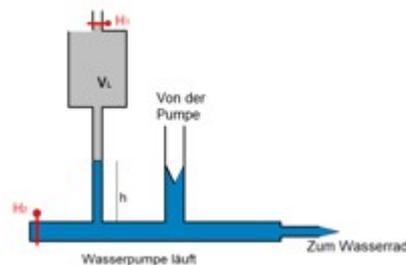


Abb. 9 Manometer im Betrieb

Abbildung 8 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 9 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  $V_L$ :

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

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

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

Bei einer Messung ergeben sich bspw.:  $V_0 = 25,0 \text{ ml}$ ;  $p_0 = 981,5 \text{ mbar}$  und  $h = 16,5 \text{ cm}$

Draus ergibt sich:

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

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.

Die Messung der Leistung der Wasserturbine kann rein mechanisch oder durch Belastung mit einem Generator erfolgen oder durch Heben von Massestücken durchgeführt werden. Bei der mechanischen Leistungsmessung nutzt man die Welle, die auf die Turbinenachse aufgeschraubt ist. Die Stabilität der Fahrradachse verkraftet die gehobenen Massen ohne Probleme

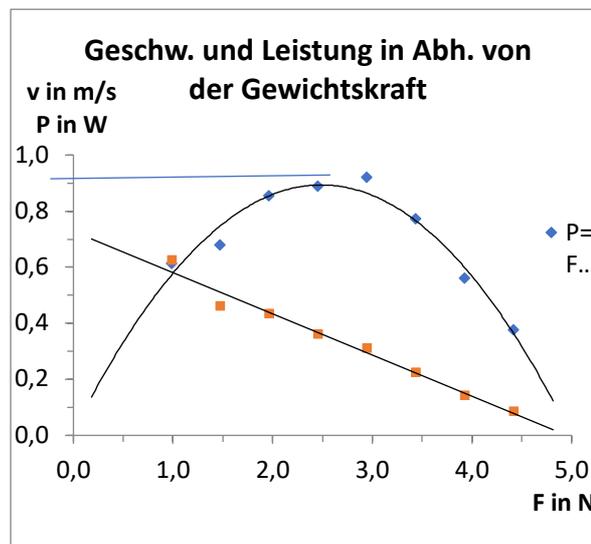


Abb.10 Welle mit Massestücken

Abb.11 Lastkurve bei mechanischer Belastung

Die Bestimmung der mechanischen Leistung mit Massestücken und der Zeit- bzw.

Geschwindigkeitsmessung kann in jeder Altersstufe durchgeführt werden. Eine

Differenzierung ist leicht möglich, im einfachsten Fall mit einer Masse von 250 g und damit beim

mpp, oder erweitert die Bestimmung des mpp durch Messung mit verschiedenen Massestücken.

Bei einer Wasserstromstärke von 7,5 l/min und einem Überdruck von 0,62 bar ( $P_{\text{mech}} = 7,75 \text{ W}$ )

erreicht man 0,9 W und damit einen Wirkungsgrad von  $0,9/7,75 = 12\%$

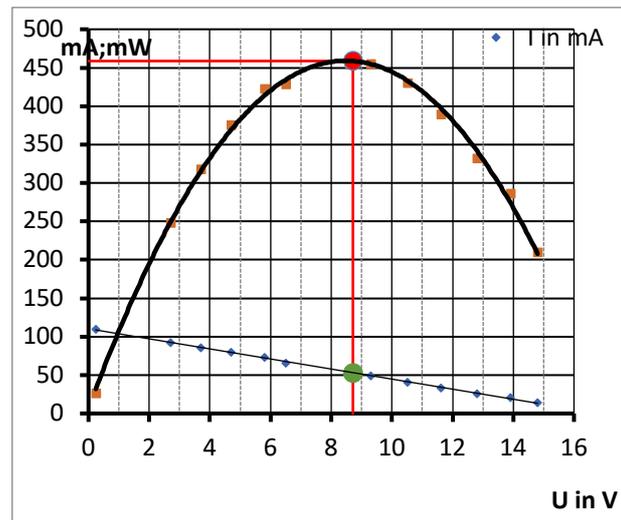
Bei der elektrischen Leistungsmessung nutzt man einen Elektromotor als Generator.

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 Abbildung 10):

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. 10 Leistung über Spannung aufgetragen zur Ermittlung des mpp

Aus Abbildung 10 ergibt sich, dass im mpp  $U_L = 8,7$  V und  $P_L = 460$  mW elektrisch abgegeben werden. Der Lastwiderstand beträgt dann 165  $\Omega$ .

Der Wirkungsgrad Wasserstrahl / Generator ist  $\eta_L = 0,46$  W / 9,1W  $\approx 5,0\%$ . 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.

*JO BECKER, war als Diplomingenieur und Elektronikentwickler in der Industrie tätig*

*BERNHARD HORLACHER, horlacher@kepler-seminar.de, ist Leiter des Kepler-Seminars für Naturwissenschaften in Stuttgart*

*HANS-MARTIN TREIN, war Lehrer für die Fächer Physik und Mathematik*

# **Windkraft als wichtige Alternativenergie - Möglichkeiten der experimentellen Umsetzung in der Schule**

JO BECKER – BERNHARD HORLACHER – HANS- MARTIN TREIN

**Der Anteil der erneuerbaren Energien an der Bruttostromerzeugung steigt seit vielen Jahre an und beträgt in Deutschland mittlerweile ca. 40 %. Davon hat die Windkraft mit ca. 52% den größten Anteil und ist viel bedeutender als die Stromerzeugung aus der Photovoltaik mit ca. 8% (1). Damit ist die Windkraft ein Thema, das es Wert ist im Technik- und Physikunterricht behandelt zu werden. Da bei der Windkraft die mechanische Energie des Windes in elektrische Energie umgewandelt wird, ist es ein ideales Thema um die Gesetzmäßigkeiten der Mechanik und Elektrizitätslehre zu verbinden.**

**Für einen experimentellen Unterricht benötigt man dazu geeignete Geräte, die möglichst alle Parameter messtechnisch leicht zugänglich machen, dabei ist besonders die quantitative Bestimmung der Windleistung reizvoll. In diesem Beitrag wird Entwicklung eines Modells für den Schulalltag beschrieben, das mittels Fahrradnabe aus Standardteilen gefertigt wurde.**

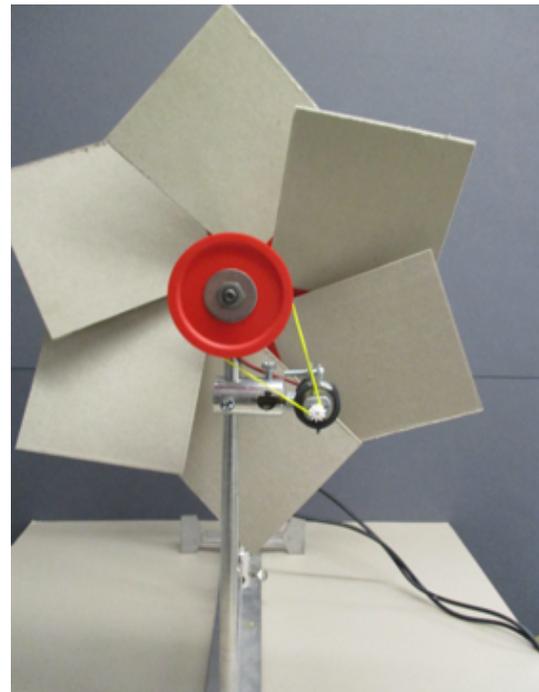
**, die mit 6 Flügeln ausgestattet ist, die selbst gestaltet werden müssen. Nach der indirekten Bestimmung der durchschnittlichen Windgeschwindigkeit werden die mechanische Leistung des Haartrockners sowie die elektrische Leistung des Generators bei Belastung mit einem variablen Widerstand gemessen und der beste Wirkungsgrad ermittelt. Die Aufgaben sind gut geeignet um physikalisches Grundwissen auf technische Probleme anzuwenden. Grundfertigkeiten in der Datendarstellung sind dabei sehr hilfreich.**

## **1 Ausgangslage und eigene Entwicklung**

Die Umwandlung von Windenergie fließt in viele Lehrpläne des Physik- und Technikunterrichts ein. Zur experimentellen Umsetzung im Unterricht gibt es von vielen Lehrmittelherstellern gute Experimentiersets, mit denen man das Thema Windenergie erarbeiten kann. Es handelt sich um Fertiggeräte, bei denen man einige Messmöglichkeiten hat, leider sind die Möglichkeiten der individuellen Gestaltung der Aufbauten begrenzt.

Es war reizvoll eine möglichst robuste Anlage zu entwickeln, bei der man bei der Gestaltung der Flügel als wichtigem Bauteil freie Hand hat und zur Überlegung und Diskussion gezwungen ist. Die dazu notwendigen Materialien müssen leicht zugänglich sein und ohne besonderes Werkzeug bearbeitbar sein. Möglichst viele Parameter sollten gemessen werden können und eine Berechnung der wichtigen Größen Leistung und Wirkungsgrad damit ermöglichen. Eine Fahrradnabe ist die günstigste und robusteste Möglichkeit für Drehbewegungen und hält dauerhaft Praktikums- bedingungen stand. Auf der Nabenachse sitzt ein Drehteil als Rotorkopf mit 6 Stehbolzen,

auf die 6 individuell gestaltete Flügel aufgesteckt werden. Als Luftquelle werden 2 Haartrockner mit Kaltluftstufe verwendet, deren Luftleistung gut gemessen werden kann. Als Generator dient ein kleiner Elektromotor; die Übersetzung von Windrad zu Generator ist ca. 8:1. Die Haartrockner und das Windrad sind auf einer Schiene montiert und damit im Abstand zueinander verschiebbar. Damit wird der Aufbau sehr einfach und kann mit Standardstativmaterial leicht realisiert werden. Mit der Windkraftanlage kann man die Windgeschwindigkeit bestimmen, am Generator mit der Stromstärke und der elektrischen Spannung alle notwendigen Parameter quantitativ messen um damit die verschiedenen Wirkungsgrade zu berechnen.

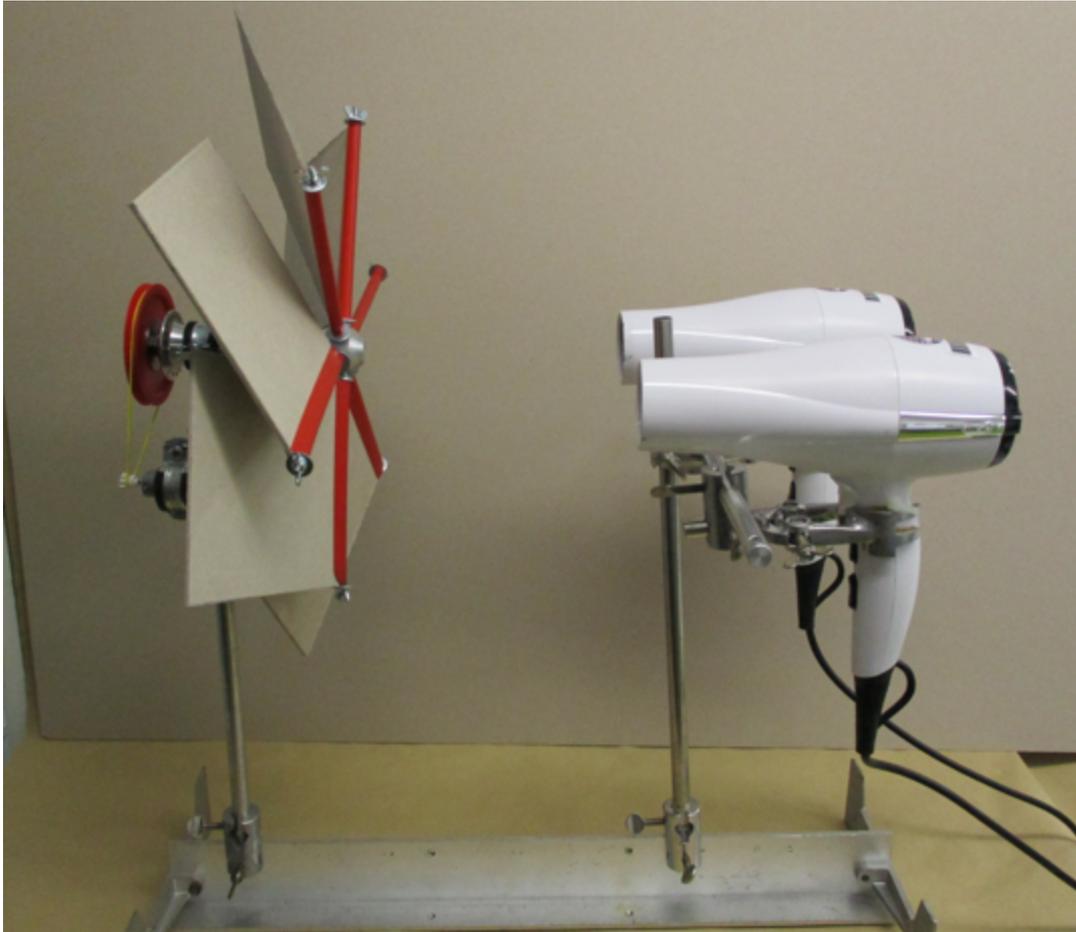


**Abb. 1. Haartrocknerseite mit 2 Haartrocknern**    **Abb. 2. Generatorseite mit Elektromotor**  
die Flügel sind noch nicht zugeschnitten

## 2 Mögliche Aufgabenstellungen

### 2.1 Entwurf der Windflügel und Ausrichtung der Flügel

Die Schüler/innen bekommen 6 identische quadratische Flächen, die so zugeschnitten werden müssen, dass noch  $\frac{2}{3}$  der quadratischen Fläche übrigbleiben. Das zwingt zum Probieren und Rechnen, was durchaus gewollt ist. Die Flächen können ebenso individuell gestaltet werden wie die Ausrichtung der Flügel. Der Einbau mit den Klemmschienen für Papier ist einfach und geht schnell, zusätzliches Werkzeug außer einem Messer oder einer Schere wird nicht benötigt, die Ergebnisse der verschiedenen Modelle werden sich im Aussehen und Betrieb deutlich unterscheiden.



**Abb. 3. Seitenansicht mit 2 gleichen Haartrocknern und Windrad auf gemeinsamer Schiene**

## 2.2 Bestimmung der Windgeschwindigkeit mit der Waage

Der Betrieb mit dem Haartrockner als Windquelle hat den Vorteil, dass man eine einfache Möglichkeit hat die Windgeschwindigkeit und die Windleistung zu ermitteln. Wenn der Haartrockner bläst, entsteht eine Rückstoßkraft, die leicht gemessen werden kann, indem man den Haartrockner auf die Waage stellt und die Luft nach oben ausströmen lässt, damit ist die Kraft  $F$  des Haartrockners auf die ausströmende Luft bekannt. Die Leistung der ausströmenden Luft kann man auf 2 Arten beschreiben.

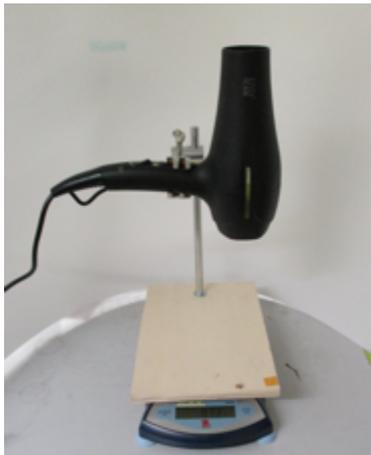
Für die Windleistung gilt:  $P_{\text{Wind}} = \frac{1}{2} m v^2 / t$ , die Masse des Windes ist  $m = \rho \cdot A \cdot s$ , damit ist  $P_{\text{Wind}} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot s / t \cdot v^2$  und somit  $P_{\text{Wind}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$ .

Die Leistung eines bewegten Körpers, und damit auch der Luft ist  $P = F \cdot v$ . Da  $P = F \cdot v$  und  $P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3$  ergibt sich durch Gleichsetzen von  $P = F \cdot v = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3$ . Somit lässt sich die

Geschwindigkeit  $v$  aus der Kraft  $F$  berechnen mit der der Haartrockner gehalten wird:  $v = \sqrt{\frac{2 \cdot F}{\rho \cdot A}}$

Diese Methode bietet gegenüber der Messung mit einem Anemometer (Windmesser) den Vorteil, dass die mittlere Windgeschwindigkeit ermittelt wird, was mit einem Anemometer schwierig ist. Die ermittelten Werte entsprechen den gemessenen Werten mit dem Anemometer sehr gut.

Diese indirekte Bestimmung der Windgeschwindigkeit  $v$  mit der Waage ist eine elegante Methode und wendet vorhandenes physikalisches Wissen (*actio = reactio*) an.



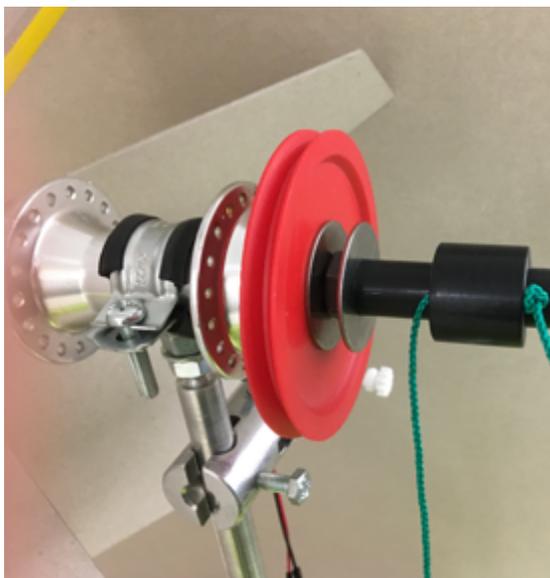
Messprinzip: Der Haartrockner steht auf der Waage. Beim Betrieb drückt er mit seinem Rückstoß auf die Waage. Eine Waage mit 0,01 g Auflösung reicht aus.

Die Austrittsfläche des Haartrockners kann gemessen und damit die Austrittsfläche berechnet werden. Der Haartrockner wird bei allen Versuchen mit der Kaltluftstufe betrieben. Sinnvoll ist ein Haartrockner mit möglichst großer Leistung und kreisförmiger Austrittsöffnung

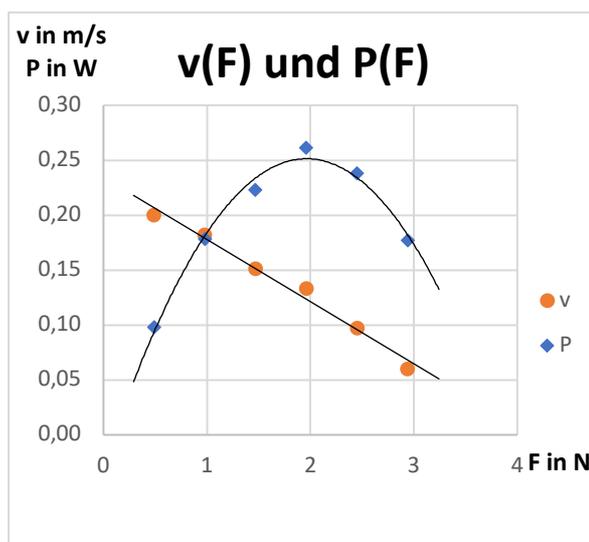
**Abb. 4. Haartrockner auf der Waage zur Bestimmung der Rockstoßkraft**

### 2.3 Bestimmung der Leistung des Windrades

Bei vielen Experimentieranordnungen begnügt man sich damit einen Verbraucher zu betreiben, was die Möglichkeiten des Experiments zu sehr begrenzt. Man kann die mechanische Leistung direkt messen, indem man mit der Achse des Windrades ein Massestück hebt oder man misst die mechanische Leistung über einen angeschlossenen Generator von dem man den Wirkungsgrad kennt. Die direkte mechanische Leistungsmessung ist leichter nachvollziehbar und bietet sich für alle Altersstufen an, die indirekte Bestimmung mit einem angeschlossenen Generator eher für höhere Klassen.



**Abb.5. Welle auf der Achse des Windrads zum Heben von Massestücken (250g)**



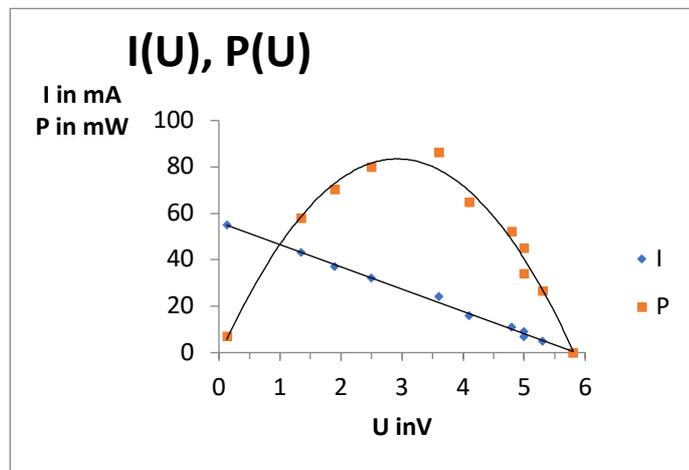
**Abb.6. mechanische Leistung des Windrads beim Heben der Massestücke (50-**

Die maximale mechanische Leistung (mwp) wird nicht bei der Maximallast von 300g, sondern bei einer Last von 200 g erreicht (Messstrecke jeweils 1 m)

Bei der Ermittlung der Maximalleistung beim Generatorbetrieb wird der Generator mit einem geeigneten Potentiometer (z.B. 1 K $\Omega$ ) in Stufen belastet. Man beginnt mit maximalem Widerstand und reduziert in kleinen Schritten bis zum Kurzschluss. Für die Eintragung in ein Diagramm bietet sich ein Tabellenkalkulationsprogramm an.



**Abb. 7. Windrad mit geeignetem Generator  
Maximalbetrieb)**

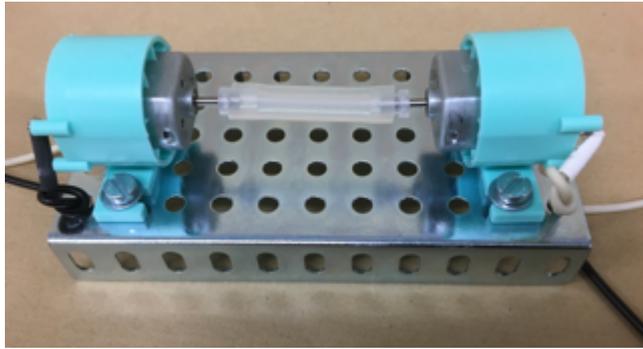


**Abb.8. Leistungskurve des Generators bei Betrieb  
2 Haartrocknern (Kaltluftstufe,**

Im Realbetrieb werden Generatoren weit unterhalb der Maximalleistung betrieben, da im maximalen Leistungsbereich die Wärmerwicklung im Generator und damit die thermische Verlustleistung zu groß wäre. Die vom Windrad aufgenommene mechanische Leistung des Windes kann auch indirekt ermittelt werden über den Wirkungsgrad des Generators, dieser wird in einer einfachen Anordnung (s.u.) bestimmt. Die Ermittlung der mechanischen Leistung mit verschiedenen Massestücken und der Geschwindigkeit mit der diese gehoben werden ist für alle Altersstufen reizvoll. Für Schüler/innen ist die Analogie zwischen mechanischer und elektrischer Leistungsmessung aufschlussreich.

## 2.4 Bestimmung des besten Wirkungsgrades des Generators

Um den Wirkungsgrad eines Generators zu ermitteln wird die Vereinfachung vorgenommen, dass die Wirkungsgrade beim Motorbetrieb und Generatorbetrieb praktisch gleich sind. Koppelt man 2 gleiche Motoren mechanisch, bei der der erste als Motor und der zweite als Generator betrieben wird, kann man den Wirkungsgrad leicht durch Messung der Stromstärke und der elektrischen Spannung auf der Motorseite bzw. Generatorseite bestimmen. Der Wirkungsgrad ist abhängig von der Last mit welcher der Generator betrieben wird, dies ist sehr wichtig für einen möglichst wirtschaftlichen Betrieb der Anlage. Mit dem errechneten Wirkungsgrad des Generators kann man dann auch den mechanischen Wirkungsgrad des Windrads bestimmen. Diese Methode ist eine sinnvolle Erweiterung der Methode mit einem Massestück, wie es oben am Beispiel des Windrades beschrieben ist.



2 baugleiche Motoren, wie in der Windkraftanlage eingebaut, werden über einen Silikonschlauch gekoppelt, damit ist die mechanische Leistung auf Generatorseite und Motorseite gleich

Abb. 6. Anordnung zur Bestimmung der Wirkungsgrade von Motor/ Generator

Einer der beiden Motoren wird als Elektromotor, der andere als Generator betrieben.

$\eta_{\text{Elektromotor}} = \text{abgegebene mechanische Leistung} / \text{aufgenommene elektrische Leistung}$

$$= \frac{P_{\text{mech. Motor}}}{P_{\text{el. Motor}}}$$

$\eta_{\text{Generator}} = \text{abgegebene elektrische Leistung} / \text{aufgenommene mechanische Leistung}$

$$\eta_{\text{Generator}} = \frac{P_{\text{el. Generator}}}{P_{\text{mech. Generator}}}$$

Also ist

$$\eta_{\text{Elektromotor}} \cdot \eta_{\text{Generator}} = \frac{P_{\text{mech. Motor}}}{P_{\text{el. Motor}}} \cdot \frac{P_{\text{el. Generator}}}{P_{\text{mech. Generator}}} = \frac{P_{\text{el. Generator}}}{P_{\text{el. Motor}}}$$

Man kann davon ausgehen, dass die vom Motor abgegebene mechanische Leistung mit der vom Generator aufgenommenen mechanischen Leistung übereinstimmt.

Wegen der Baugleichheit von Motor und Generator ist  $\eta_{\text{Elektromotor}} = \eta_{\text{Generator}}$ ,

$$\eta^2 = \frac{P_{\text{el. Generator}}}{P_{\text{el. Motor}}} \quad \text{und damit zu } \eta = \sqrt{\frac{P_{\text{el. Generator}}}{P_{\text{el. Motor}}}}$$

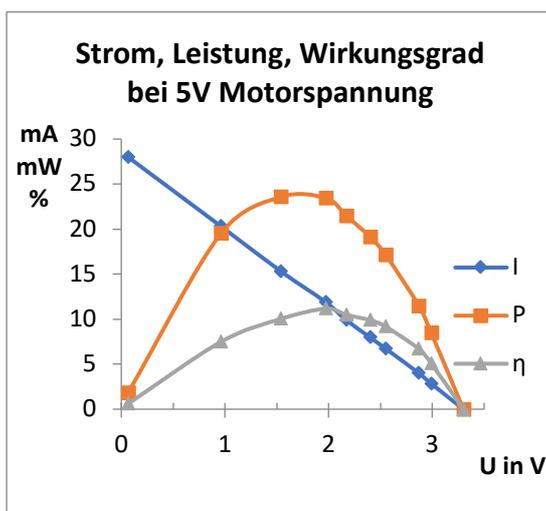


Abb. 7. Leistungsdaten des Motors  
Leistung / Wirkungsgrad

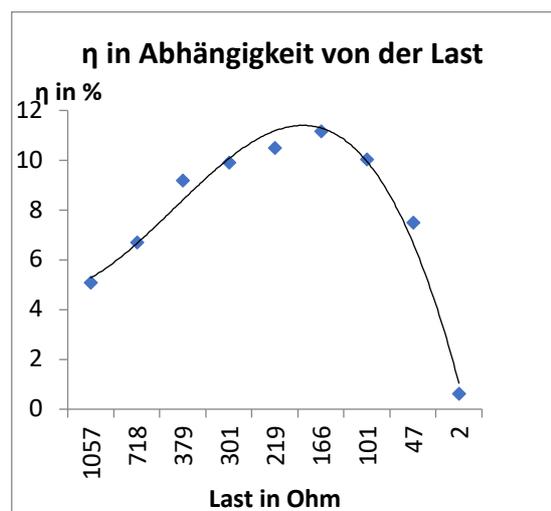


Abb.8. Wirkungsgrad des Generators  
in Abhängigkeit von der Last

Im Technikunterricht geht es nicht darum, mit den Versuchsanordnungen möglichst realitätsnahe Wirkungsgrade zu erzielen, sondern den Wirkungsgrad messtechnisch zugänglich zu machen. Da der Großteil der mechanischen Leistung des Windrades bei der Umwandlung von

mechanischer Leistung in elektrische Leistung verloren geht, ist auch die mechanische Leistung des Windrades von Interesse.

Diese kann durch Umstellen der Formel ermittelt werden:

$$\eta_{\text{Generator}} = \frac{P_{\text{el. Generator}}}{P_{\text{mech. Generator}}} \quad P_{\text{mech. Generator}} = \frac{P_{\text{el. Generator}}}{\eta_{\text{Generator}}}$$

In der obigen Messung beträgt  $\eta_{\text{Generator}}$  ca. 30 %, daraus folgt, dass die mechanische Leistung des Windrades mindestens das ca. 3,3 fache der elektrischen Leistung des Generators beträgt.

## 2.5 Abhängigkeit der Generatorleistung von der Windleistung

Für die Windleistung gilt theoretisch:  $P_{\text{Wind}} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot s \cdot v^2$ . Die Masse ist  $m = \rho \cdot A \cdot s$ , damit ist

$$P_{\text{Wind}} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot s / t \cdot v^2 \text{ und somit } P_{\text{Wind}} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3.$$

Die Windleistung ist  $P_{\text{Wind}} = k \cdot v^3$ , also proportional zur 3. Potenz von  $v$ . Gilt dies auch für unsere Anordnung?

Die einfache Möglichkeit zur Bestimmung der mittleren Windgeschwindigkeit mit Hilfe der Waage ermöglicht diese quantitativ zu bestimmen. Dazu wird der Haartrockner (mit Kaltluftstufe) mit halber und mit normaler Gebläseleistung betrieben und wie oben beschrieben mit Hilfe der Waage nach:  $v =$

$$\sqrt{\frac{2 \cdot F}{\rho \cdot A}} \text{ und damit } \frac{v_2}{v_1} = \sqrt{\frac{F_2}{F_1}} \text{ die Luftgeschwindigkeit berechnet.}$$

Aus unseren Messwerten ergab sich folgendes Diagramm und folgende Tabelle:

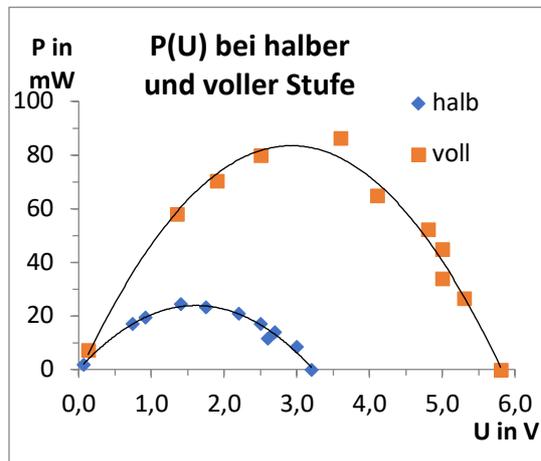


Abb.8. Generatorleistung bei halber und voller Windleistung

Leistungsstufe	Windgeschwindigkeit	Windleistung	Generatorleistung im mpp
halb	$v_1 = 16,6 \frac{m}{s}$	$P_{1,W}=3,7W$	$P_{1,G}=25mW$
voll	$v_2 = 25,3 \frac{m}{s}$	$P_{2,W}=13W$	$P_{2,G}=85mW$
Quotienten	1,5	3,5	3,4

Abb.9. Verhältnis von Windgeschwindigkeit / Windleistung / Generatorleistung

Im mpp findet man bei der vorhandenen Anlage (Abstand Haartrockner- Windflügel = 20 cm) eine Generatorleistung von  $P_{1,G} = 25 \text{ mW}$  und  $P_{2,G} = 85 \text{ mW}$ , damit ist  $P_{2,G} = 3,4 \cdot P_{1,G}$ . Beim Wechsel der Leistungsstufe wird die Luftgeschwindigkeit 1,5 mal größer und damit die Windleistung 3,5

mal größer. Die Generatorleistung im mpp ist 3,4 mal größer und entspricht damit sehr gut dem Verhältnis der Windleistung.

## **5 Zusammenfassung**

Mit der Verwendung von Haartrocknern und eines geeigneten Elektromotors als Generator sind sämtliche Parameter bestimmbar, die zur Berechnung der Leistung des Windrades notwendig sind.

Mit der Fahrradnabe hat man ein leichtgängiges und äußerst robustes System zur Verfügung mit dem physikalisches Wissen kann auf technische Problemstellungen angewendet werden kann, die Analogie von Mechanik und Elektrik ist offensichtlich. Durch die individuelle Gestaltungsmöglichkeit des Hauptbauteils zu geringen Kosten ist die Anordnung auch für ein Praktikum attraktiv.

Für die Windkraftanlage benötigt man: 1x Hinterradfahrradnabe, 1x Gewindestange M 4 mm 100 mm aufgeteilt in 6 gleiche Stücke, drei langsam laufende Elektromotoren als Motor- bzw. Generator (bspw. Firma Varikabi), 6 x M 4 Muttern und Unterlagscheiben, 6 Klemmschienen für Papier, 6x Depronplatten/ Gruppe 3 mm Dicke 16 x16 cm besser Graupappe 1,5 mm 16 x16 cm  
1x Flügelnabe aus Alu mit 6 Löchern, Welle zum Aufwickeln der Schnur. Nabe und Wellen können von den Autoren bezogen werden, eine Variante aus dem 3- D- Drucker kann von den Autoren abgerufen werden, Ein komplettes Set ist auch erhältlich.

### **Autorenhinweise**

JO BECKER war als Diplomingenieur Elektronikentwickler in der Industrie

BERNHARD HORLACHER, Horlacher@kepler-seminar.de

, ist Leiter des SFL Kepler-Seminar Stuttgart e.V.

HANS- MARTIN TREIN war Lehrer für Physik und Mathematik

Lit : (1) <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html>