

Windkraft als wichtige Alternativenenergie

Möglichkeiten der experimentellen Umsetzung in der Schule

JO BECKER – BERNHARD HORLACHER – HANS-MARTIN TREIN

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 die Entwicklung eines Modells für den Schulalltag beschrieben, das mittels Fahrradnabe aus Standardteilen gefertigt wurde. Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit errechnet sich aus der Rückstoßkraft des Haartrockners. Daraus erhält man die mechanische Leistung des Luftstroms. Die elektrische Leistung des Generators bei Belastung wird mit einem variablen Lastwiderstand gemessen und der beste Wirkungsgrad ermittelt.

1 Ausgangslage und eigene Entwicklung

Der Anteil der erneuerbaren Energien an der Bruttostromerzeugung steigt seit vielen Jahren an und beträgt in Deutschland mittlerweile ca. 40 %. Davon hat die Windkraft mit ca. 52 % den größten Anteil und ist bedeutender als die Stromerzeugung aus der Photovoltaik mit ca. 8 % (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2021). Damit ist die Windkraft ein Thema, das es Wert ist im Technik- und Physikunterricht behandelt zu werden und 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 überwiegend um Fertiggeräte, bei denen man einige Messmöglichkeiten hat, leider sind deren Möglichkeiten der individuellen Gestaltung der Aufbauten jedoch 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 und ohne besonderes Werkzeug bearbeitbar sein. Die Parameter Windgeschwindigkeit, Stromstärke, elektrische Spannung und mechanische Kräfte sollten gemessen werden können und eine Berechnung der wichtigen Größen Leistung und Wirkungsgrad damit ermöglichen. Eine Fahrradnabe ist eine sehr günstigste und robuste Möglichkeit für Drehbewegungen und hält dauerhaft Praktikumsbedingungen 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, langsam laufender Elektromotor (siehe Abb.1); die Übersetzung von Windrad zu Generator ist ca. 12:1. Die Haartrockner und das Windrad sind auf einer Schiene montiert und damit im Abstand zueinander verschiebbar (siehe Abb.2). Damit wird der Aufbau sehr einfach und kann mit Standardstativmaterial leicht realisiert werden. Mit einer Kraftmessung kann man die Windgeschwindigkeit und -energie

bestimmen; durch Heben einer Last die mechanische Leistung des Windrads. Am Generator werden mit der Stromstärke und der elektrischen Spannung alle notwendigen Parameter gemessen. So sind die verschiedenen Wirkungsgrade berechenbar.

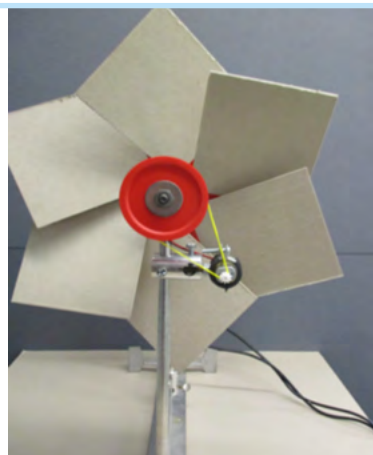


Abb. 1. Generatorseite mit Elektromotor als Generator

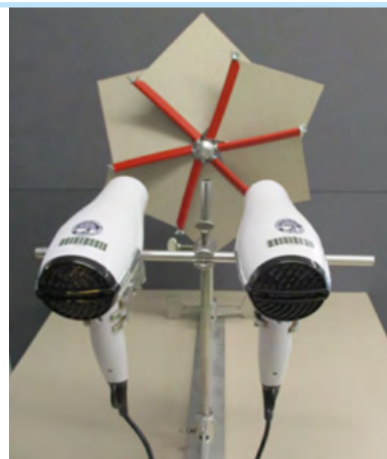


Abb. 2. Haartrocknerseite mit 2 Haartrocknern (Flügel sind noch nicht zugeschnitten)

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 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 ist einfach und geht schnell, zusätzliches Werkzeug außer einem Messer oder einer Schere wird nicht benötigt. Die verschiedenen Modelle werden sich im Aussehen und in der Leistung deutlich unterscheiden. In den Versuchsanleitungen wird bewusst darauf verzichtet die optimale Flügelform abzubilden, auch der schnelle Blick ins Internet hat keine Lösung parat.



Abb. 3. Seitenansicht mit 2 gleichen Haartrocknern und Windrad auf einer gemeinsamen 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 eine Waage stellt und die Luft nach oben ausströmen lässt (siehe Abb. 4). 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 im stationären Zustand ($v = \text{const.}$):

$$P = \frac{\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2}{t} \quad \text{mit der Masse des Windes } m = \rho \cdot A \cdot s.$$

$$\text{Damit ist } P_{\text{Wind}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot s \cdot v^2}{t} \quad \text{und somit}$$

$$P_{\text{Wind}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3.$$

A ist die Querschnittsfläche der Öffnung des Haartrockners, ρ ist die Dichte der Luft.

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



Abb. 4. Haartrockner auf der Waage zur Bestimmung der Rückstoßkraft

Der Haartrockner steht auf der Waage. Beim Betrieb drückt er mit seinem Rückstoß auf die Waage (eine Waage mit 0,1 g Unterteilung 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 zu benutzen.

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.

Die maximale mechanische Leistung (mpp) wird nicht bei der Maximallast von 300g, sondern bei einer Last von 200g erreicht (Messstrecke jeweils 1 m). Bei der Ermittlung der Maximalleis-

tung beim Generatorbetrieb wird der Generator mit einem geeigneten Potentiometer (z.B. 1k Ω) in Stufen belastet. Man beginnt mit maximalem Widerstand und reduziert in kleinen Schritten bis zum Kurzschluss. Für die Eintragung in ein Diagramm bietet sich auch hier ein Tabellenkalkulationsprogramm an.



Abb. 5. Welle auf der Achse des Windrads zum Heben von Massestücken

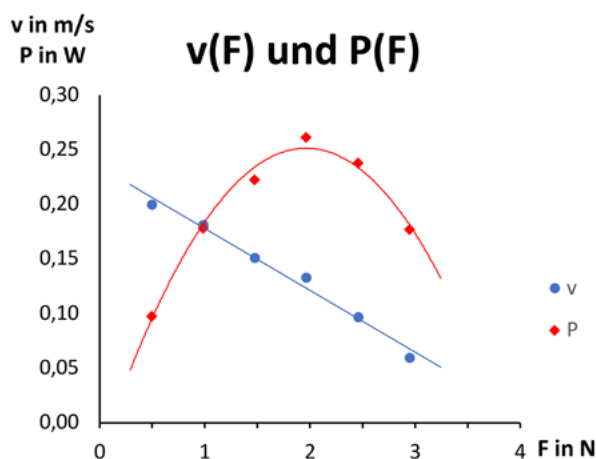


Abb. 6. Mechanische Leistung des Windrads beim Heben der Massestücke (50g bis 250g)

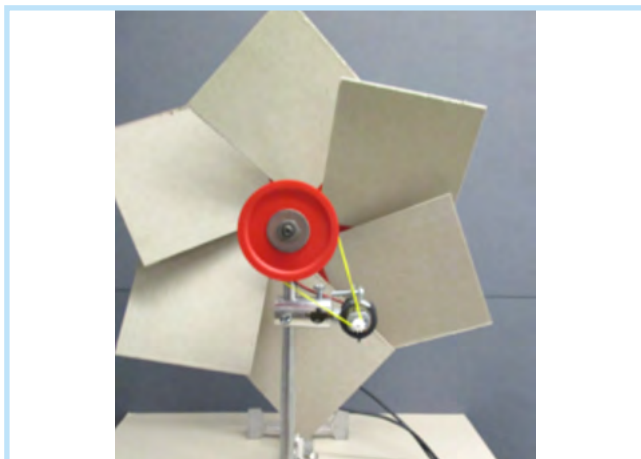


Abb. 7. Windrad mit geeignetem Generator

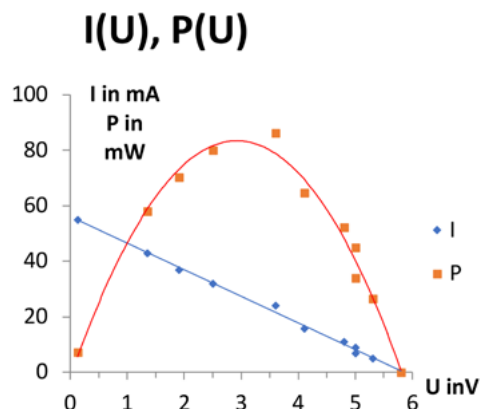


Abb. 8. Leistungskurve des Generators beim Betrieb mit zwei Haartrocknern (Kaltluftstufe, Maximalbetrieb)

Im öffentlichen Stromnetz werden Generatoren unterhalb der Maximalleistung betrieben, da im maximalen Leistungsbereich die Wärmentwicklung 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 (siehe Abb. 9) 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 sehr 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. Kopelt man zwei 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 den mechanischen Wirkungsgrad des Windrads bestimmen. Diese Methode ist eine Alternative zur Methode Anheben eines Massestücks, wie es oben am Beispiel des Windrades beschrieben ist.

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

Es gilt: $\eta_{\text{Elektromotor}} = \frac{\text{abgegebene mechanische Leistung}}{\text{aufgenommene elektrische Leistung}}$

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

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

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

Also ist:

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

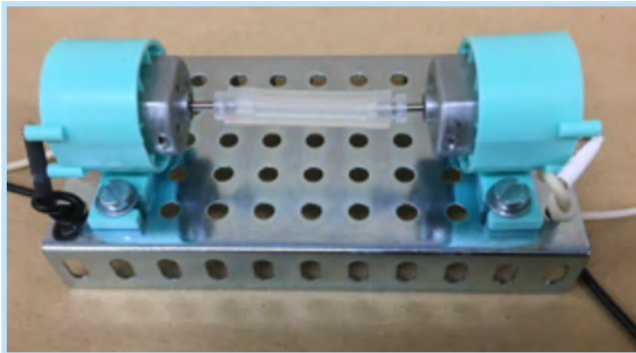


Abb. 9. Anordnung zur Bestimmung der Wirkungsgrade von Motor/Generator

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 $\eta_{\text{Elektromotor}} = \eta_{\text{Generator}}$,

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

Ergebnis einer Messung: Im mpp haben der Generator 23mW und der Motor 220mW Leistung.

$$\text{Damit ist } \eta = \sqrt{\frac{23\text{mW}}{220\text{mW}}} \approx 0,32 = 32\%.$$

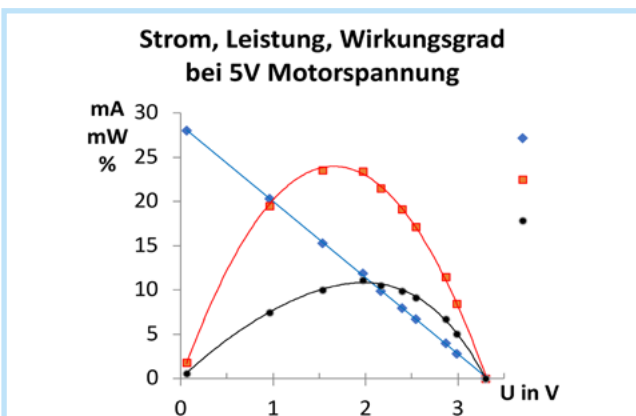


Abb. 10. Leistung und Wirkungsgrad des Generators

Der Antriebsmotor wird mit einer Spannung von 5 V betrieben, der Generator wird mit einem Potentiometer (1kΩ) belastet. Man beginnt mit maximalem Widerstand und reduziert in kleinen Schritten bis zum Kurzschluss (siehe Abb. 10). Strom (blau)

und Spannung werden am Widerstand gemessen. Die Leistung als Produkt aus Strom und Spannung ergeben die Parabel. Der Wirkungsgrad (schwarz) ist der Quotient aus Generatorleistung und Motorleistung. Der beste Wirkungsgrad η ist gegenüber dem mpp zu höherer Spannung und damit geringerer Stromstärke verschoben.

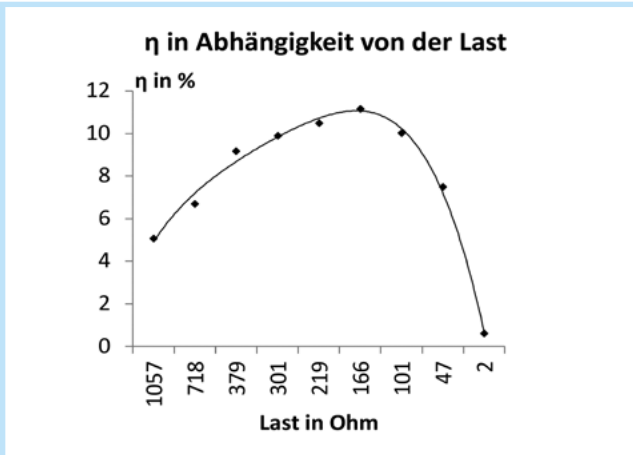


Abb. 11. Wirkungsgrad des Generators in Abhängigkeit von der Last

Bei maximaler Last (Kurzschluss) ist die Generatorleistung minimal, da bei maximaler Stromstärke die Spannung zusammenbricht. Bei minimaler Last (1kΩ) fließt ein zu geringer Strom; auch im mpp des Generators (ca. 120Ω) ist η nicht optimal, da hier die Stromstärke und damit die Wärmeentwicklung im Generator zu groß ist. Das beste Verhältnis von abgegebener Generatorleistung zur zugeführten Motorleistung liegt bei einer Last von 166Ω.

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. 32 %, daraus folgt, dass die mechanische Leistung des Windrades mindestens das ca. 3,2 fache der elektrischen Leistung des Generators beträgt.

2.5 Abhängigkeit der Generatorleistung von der Windleistung

Für die Windleistung gilt $P_{\text{Wind}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$ (siehe 2.2), 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.

Gebläsestufe (Kaltluft)	Kraft der Haartrockner auf die Waage	Wind- geschwindigkeit $v = \sqrt{\frac{2 \cdot F}{\rho \cdot A}}$	Windleistung der Haartrockner $P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$	mechanische Leistung des Windrades $P = F \cdot v$	Generatorleistung im mpp $P = U \cdot I$
halb	$F_1 = 0,22 \text{ N}$	$v_1 = 16,6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$P_{1,W} = 3,7 \text{ W}$	75 mW	$P_{1,G} = 25 \text{ mW}$
voll	$F_2 = 0,52 \text{ N}$	$v_2 = 25,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$P_{2,W} = 13 \text{ W}$	250 mW	$P_{2,G} = 85 \text{ mW}$
Quotient	ca. 2,4	ca. 1,5	ca. 3,5	ca. 3,3	3,4

Tab. 1. Verhältnisse von Windgeschwindigkeit, Windleistung und Generatorleistung ($\rho = 1,28 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ und $A = 0,00126 \text{ m}^2$)

Wie oben beschrieben werden mit der Beziehung $v = \sqrt{\frac{2 \cdot F}{\rho \cdot A}}$ die Luftgeschwindigkeiten berechnet. Ihr Quotient ist $\frac{v_2}{v_1} = \sqrt{\frac{F_2}{F_1}}$.

Aus unseren Messwerten ergab sich folgendes Diagramm bzw. folgende Tabelle (Tab. 1):

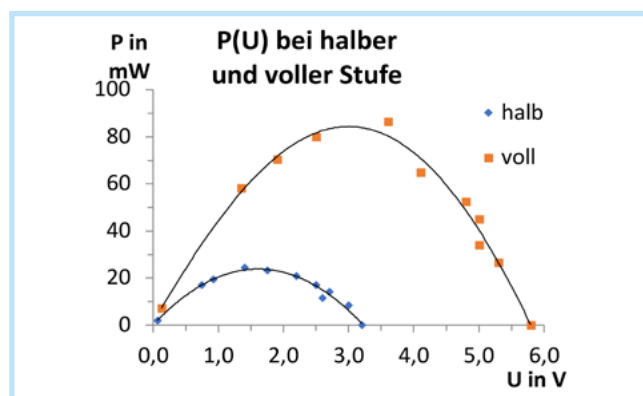


Abb. 12. Generatorleistung bei halber und voller Windleistung

Laut Theorie sollte die Windleistung P_{Wind} mit v^3 steigen. Die Bestimmung der Windgeschwindigkeit mit der Waage ermöglicht einen leichten Zugang zur Windgeschwindigkeit und damit zur Berechnung der theoretischen Windleistung. Bei zwei verschiedenen Windgeschwindigkeiten wird der mpp des Generators bestimmt. Damit kann man die über die Windgeschwindigkeit errechnete Windleistung und die experimentell bestimmte Generatorleistung vergleichen.

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 ca. 1,5mal größer und damit die Windleistung ca. 3,5mal größer. Die Generatorleistung im mpp ist 3,4mal größer und entspricht damit sehr gut dem Verhältnis der Windleistung.

3 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 vorgestellten Umsetzung mittels Fahrradnabe hat man ein leichtgängiges und äußerst robustes System zur Verfügung, mit dem physikalisches Wissen auf technische Problemstellungen angewendet werden kann; die Analogie von Mechanik und Elektronik ist offensichtlich. Durch die individuelle Gestaltungsmöglichkeit des Hauptbauteils bei geringen Kosten ist die Anordnung auch für ein Praktikum attraktiv.

Sobald die Aufgabe für die Schüler/innen erläutert ist und sie die Flügel in Händen haben, wird mit einer intensiven Diskussion über die beste Form und den besten Anstellwinkel begonnen. Der Vergleich der Ergebnisse bei verschiedenen Gruppen erfolgt durch Messung der mechanischen Leistung mit gleicher Last in der Nähe des mpp (z. B. 250 g) bzw. elektrischer Leistung mit gleichem Widerstand ebenfalls in der Nähe des mpp (z.B. 165 Ω).

Benötigte Materialien:

Für die Windkraftanlage benötigt man: 1x Hinterradfahrradnabe, 1x Gewindestange M 4mm 100mm aufgeteilt in 6 gleiche Stücke, drei langsam laufende Elektromotoren als Motor- bzw. Generator (bspw. Firma Variakabi), 6 x M4 Muttern und Unterlagscheiben, 6 Klemmschienen für Papier, 6x Depronplatten / Gruppe 3mm Dicke 160 x 160 mm, bzw. Graupappe 1,5mm 160 x 160 mm, 1x Flügelnabe aus Alu mit 6 Löchern, 1 Welle zum Aufwickeln der Schnur.

Nabe und Welle können von den Autoren bezogen werden, eine Variante aus dem 3D-Drucker kann von den Autoren abgerufen werden. Ein komplettes Set ist auch erhältlich.

Literatur

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2021). Erneuerbare Energien. URL unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html> (Stand: 23.03.2021).

JO BECKER war als Elektronikentwickler in der Industrie tätig.

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

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